



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE MÁQUINA CNC DE BAIXO
CUSTO PARA PROCESSOS DE CORTE E GRAVAÇÃO EM MICRO E
PEQUENAS EMPRESAS**

Nathan Gobi

Lajeado, novembro de 2018

Nathan Gobi

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE MÁQUINA CNC DE BAIXO
CUSTO PARA PROCESSOS DE CORTE E GRAVAÇÃO EM MICRO E
PEQUENAS EMPRESAS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Protótipo, CNC, Sistemas Embarcados.

Orientador: Prof. Me. Henrique Worm

Lajeado, novembro de 2018

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) de pequeno porte e baixo custo para utilização nos processos de corte e gravação em micro e pequenas empresas dos ramos gráfico, joias, artesanato, madeira, plástico, entre outros. O trabalho demonstra o desenvolvimento da estrutura mecânica, *drivers* de acionamento e *software* de interface gráfica. A estrutura mecânica foi construída em formato de pórtico e possibilita a movimentação da ferramenta em três dimensões (X, Y e Z) sobre uma mesa de trabalho. Os *drivers* de acionamento foram concebidos em formato de PCI (Placa de Circuito Impresso) e são responsáveis por controlar os motores de passo de movimentação da máquina. Para o usuário carregar e ajustar o código CNC e funcionalidades da máquina, foi criado um *software* de interface gráfica. Para gerenciar o controle da máquina, uma placa microcontroladora Arduino foi utilizada, efetuando a conversão de comunicação entre interface gráfica e *hardware* eletrônico. O sistema desenvolvido foi validado com testes de corte e gravação em chapas de MDF, que são apresentados neste trabalho. Os resultados obtidos nos testes demonstraram que o equipamento é capaz de executar as operações de forma compatível com sistemas similares, atendendo ainda aos critérios de baixo custo.

Palavras-chave: Protótipo fresadora, Comando Numérico Computadorizado (CNC), Motor de passo, Arduino.

ABSTRACT

This work presents the development of a prototype CNC machine (Computer Numerical Command) of small size and low cost for use in the cutting and engraving processes in micro and small companies of the graphic, jewellery, handicraft, wood, plastic and others branches. The work demonstrates the development of mechanical structure, control drivers and GUI software. The mechanical structure was built in a gantry format and enables the tool to be moved in three dimensions (X, Y and Z) on a work table. The control drivers are designed in PCB format (Printed Circuit Board) and are responsible for controlling stepper motors for machine movement. For the user to program and adjust the CNC code and machine features, a graphical interface software has been created. To manage the control of the machine, an Arduino microcontroller board was used, converting the communication between graphic interface and electronic hardware. The developed system was validated with cutting and engraving tests on MDF sheets, which are presented in this work. The results obtained in these tests demonstrated that the equipment is able to perform the operations in a way compatible with similar systems, also meeting the criteria of low cost.

Keywords: Prototype milling machine, Computer Numerical Command (CNC), Stepper motor, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do sistema proposto.	14
Figura 2 - Fresadora <i>Hydrotel</i> da <i>Cincinnati Company</i>	17
Figura 3 - Protótipo da primeira máquina CN.	18
Figura 4 - Coordenadas X, Y, Z e pontos de referência de uma fresadora CNC.	19
Figura 5 - Coordenada absoluta e incremental.	19
Figura 6 - Estrutura de um bloco de programação.	20
Figura 7 - Trajetória do programa da Tabela 4.	24
Figura 8 - Trajetória do programa da Tabela 5.	25
Figura 9 - <i>Router</i> CNC RC0807 - Distritec	27
Figura 10 - CNC <i>Hobby</i> v2.0 - CompuSoftwareBR	28
Figura 11 - <i>Router</i> CNC A6550 - JDR Projetos e componentes.	29
Figura 12 - Modelo de motor universal.	30
Figura 13 - Motor de passo.	31
Figura 14 - Motor de passo relutância variável.	32
Figura 15 - Motor de passo ímãs permanentes.	32
Figura 16 - Motor de passo híbrido.	33
Figura 17 - Vista em corte motor de passo híbrido.	34
Figura 18 - Características rotor motor de passo híbrido.	34
Figura 19 - Número de fios e tipos de ligações motores de passo.	35
Figura 20 - Modo de operação unipolar.	36
Figura 21 - Modo de operação bipolar com ponte H.	37
Figura 22 - Passo completo, simples excitação de fase (<i>wave drive</i>).	38
Figura 23 - Passo completo, dupla excitação de fase (<i>full step</i>).	38

Figura 24 - Meio passo (<i>half step</i>).....	39
Figura 25 - Circuito ponte H.	40
Figura 26 - Principais plataformas Arduino.	42
Figura 27 - Diagrama simplificado do sistema.....	44
Figura 28 - Estrutura mecânica.	45
Figura 29 - Guia esférico linear.	46
Figura 30 - Fuso trapezoidal.....	47
Figura 31 - Características motores de passo.....	48
Figura 32 - Características tupia.	49
Figura 33 - Painel Eletrônico.	50
Figura 34 - Diagrama de ligações do <i>hardware</i>	51
Figura 35 - <i>Shield</i> de Interface CNC.	53
Figura 36 - Circuito da CNC <i>shield</i>	54
Figura 37 - Diagrama de blocos CI L297.....	55
Figura 38 - Circuito <i>chopper</i>	56
Figura 39 - Circuito de comando <i>driver</i> motor de passo.....	57
Figura 40 - Diagrama de blocos CI L6203.....	58
Figura 41 - Circuito de potência <i>driver</i> motor de passo.....	59
Figura 42 - <i>Driver</i> motor de passo em PCI.....	60
Figura 43 - Tela de configuração de conexão da máquina.	61
Figura 44 - Tela principal interface gráfica.	62
Figura 45 - Trajetória interpolação linear.....	65
Figura 46 - Fluxograma do algoritmo implementado na placa microcontroladora.	68
Figura 47 - Configuração do material.	71
Figura 48 - Desenho da peça para corte.....	71
Figura 49 - Configuração de corte.....	72
Figura 50 - Fresa Ø 7 mm.	73
Figura 51 - Chapa MDF fixada para o corte.	73
Figura 52 - Tela interface gráfica processo de corte finalizado.	74
Figura 53 - Teste de corte peça 1.	74
Figura 54 - Teste de corte peças 1, 2, 3 e 4.....	75
Figura 55 - Gravura engenharia elétrica.....	76

Figura 56 - Gravura Univates.	76
Figura 57 - Configuração de gravação.	77
Figura 58 - Fresa V Ø 12,7 mm.	77
Figura 59 - Tela interface gráfica processo de gravação engenharia elétrica finalizado.	78
Figura 60 - Tela interface gráfica processo de gravação logo Univates finalizado.	79
Figura 61 - Teste de gravação engenharia elétrica.	79
Figura 62 - Teste de gravação logo Univates.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de caracteres mais utilizados em programação CNC.....	20
Tabela 2 - Instruções tipo G (preparatórias) mais utilizadas em programação CNC.	21
Tabela 3 - Instruções tipo M (miscelâneas) mais utilizadas em programação CNC..	22
Tabela 4 - Exemplo de programa interpolação linear.....	24
Tabela 5 - Exemplo de programa interpolação circular.	25
Tabela 6 - Custo do projeto.....	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

°	Grau
Ω	Ohm
3D	Três Dimensões
A	Ampère
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
ASCII	<i>American Standard Code for information Interchange</i> (Código Padrão Norte-americano para Intercâmbio de Informações)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido Por Computador)
CI	Circuito Integrado
CN	<i>Numeric Control</i> (Comando numérico)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Comando numérico computadorizado)
COM	Comum
CW/CCW	<i>Clockwise/Counterclockwise</i> (Sentido Horário/Sentido Anti-horário)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Continua)
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória Somente Leitura Programável Apagável Eletricamente)
EIA	Electronic Industries Association (Aliança das Indústrias Eletrônicas)
F	Farad
FET	<i>Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo)
Hz	Hertz

IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
I/O	<i>Input/Output</i> (Entrada/Saída)
kgf.cm	Quilograma Força Por Centímetro
mA	Miliampère
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Placa de Fibra de Média Densidade)
MHz	Mega Hertz
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
mm	Milímetros
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> (Associação Nacional de Fabricantes Elétricos)
OS	<i>Operating system</i> (Sistema Operacional)
PCB	<i>Printed circuit board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação de Largura de Pulso)
RPM	Rotações Por Minuto
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória Estática De Acesso Aleatório)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
V	Volt
W	Watts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Comando Numérico Computadorizado (CNC)	16
2.1.1 Coordenadas e referências CNC	18
2.1.2 Programação CNC	20
2.1.3 Mercado de CNC	26
2.2 Motor Universal.....	29
2.3 Motor de Passo	30
2.3.1 Modo de operação	35
2.3.2 Modos de acionamento	37
2.4 Circuito Ponte H.....	40
2.5 Placa Microcontroladora Arduino	41
3 DESENVOLVIMENTO	43
3.1 Visão geral do sistema	43
3.2 Estrutura mecânica.....	44
3.2.1 Guia esférico linear.....	45
3.2.2 Fuso trapezoidal	46
3.2.3 Motores de passo	47
3.2.4 Motor ferramenta	49
3.3 <i>Hardware</i> de controle e acionamento	49
3.3.1 Placa microcontroladora.....	52
3.3.2 <i>Driver</i> de acionamento motor de passo.....	54
3.4 <i>Software</i> de interface gráfica	61
3.4.1 Algoritmo da placa microcontroladora	63
3.5 Custo do projeto	68
4 RESULTADOS	70
4.1 Teste prático de corte.....	70
4.2 Teste prático de gravação.....	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A globalização, em conjunto com a evolução tecnológica ao longo dos últimos anos, tem afetado de forma expressiva a inserção de empresas no mercado. No passado, a comprovação do padrão de qualidade era o suficiente para entrar no mercado. Entretanto, a constante atualização e evolução dos produtos, aliados a maior competitividade entre empresas e exigências dos consumidores, tornaram necessário o projeto de produtos com custo de produção e preço de venda reduzidos, mantendo a alta qualidade (PROFUTURO, 2017).

Segundo Ludwig et. al. (2013), a automação no setor moveleiro por meio de máquinas CNCs é algo crescente desde 1995, quando a primeira máquina chegou ao Brasil. Hoje as máquinas CNCs são indispensáveis neste segmento, tendo em vista a redução de custos, tempo de produção e qualidade gerada pela sua utilização, garantindo mais competitividade às empresas.

Complementam os autores que uma máquina convencional precisa ser ajustada por operadores a cada lote de peças, mas com as CNCs, os ajustes são feitos automaticamente pela máquina, que necessita apenas das dimensões das peças via programa CNC. Conforme estudo realizado pelos autores, a substituição dos processos manuais por automatizados no ramo moveleiro proporcionou redução de 78,8% no tempo de fabricação, promovendo melhorias no padrão das peças, diminuição dos retrabalhos e aumento da qualidade do produto acabado, garantindo redução dos custos, sem comprometer a qualidade do produto.

Batista (2013) fala que, no passado, a joia era criada por ourives que moldavam o metal aquecido em forjas sem a necessidade de criação de um modelo gráfico computadorizado. Segundo Fonseca et al. (2006), em diversas empresas de joias, a etapa de modelagem física é concebida de forma manual, realizada em cera sólida, onde um artesão modelista pode levar horas, dias e até mesmo semanas para concluir uma peça modelo, atrasando e encarecendo o produto final.

Nesse contexto, conforme cita Batista (2013), as indústrias joalheiras têm buscado otimizar o processo de fabricação, eliminando a modelagem de cera artesanal e substituindo-a por prototipagem computadorizada ou também chamada de prototipagem rápida, onde a peça modelo é desenhada em *software* de modelagem e posteriormente confeccionada por uma máquina CNC.

Estudos desenvolvidos por Feuser et al. (2015) demonstram a evolução de uma empresa de artesanato após a aquisição de uma máquina CNC.

Os pedidos eram recebidos semanalmente, e aconteciam de forma constante, sem oscilações que pudessem sobrecarregar [...] em dois anos um novo tipo de cliente bateu-lhe à porta: decoradores de festas em geral. Este cliente efetuava seus pedidos com prazos curtíssimos, [...] com menos de dois dias de prazo, [...] neste momento, houve a primeira decisão de investimento: uma máquina CNC Router. [...] efetuando cortes automaticamente na madeira de forma quase perfeita, suprimindo a demanda específica dos decoradores de festa [...]. No mês seguinte à compra do maquinário, além do preço unitário das peças aumentarem, dada a complexidade dos modelos agora produzidos, a produção mais que dobrou. O retorno havia sido muito maior do que o esperado pelos sócios [...] (FEUSER et al., 2015, p. 7-8).

Conforme avaliação do estudo de Feuser et al. (2015), a implantação de uma máquina CNC em empresa de artesanato, se mostrou muito eficiente, tornando a produção mais compacta e produtiva, além de elevar a qualidade e rentabilidade sobre cada produto produzido. Aliado a isso, os ganhos gerados pela máquina elevaram o crescimento da empresa a patamares exponenciais, possibilitando a compra de mais duas máquinas CNCs.

Mas, apesar de inúmeras vantagens dessa tecnologia, Ludwig et. al. (2013) citam que alguns pontos devem ser levados em consideração. A alta tecnologia

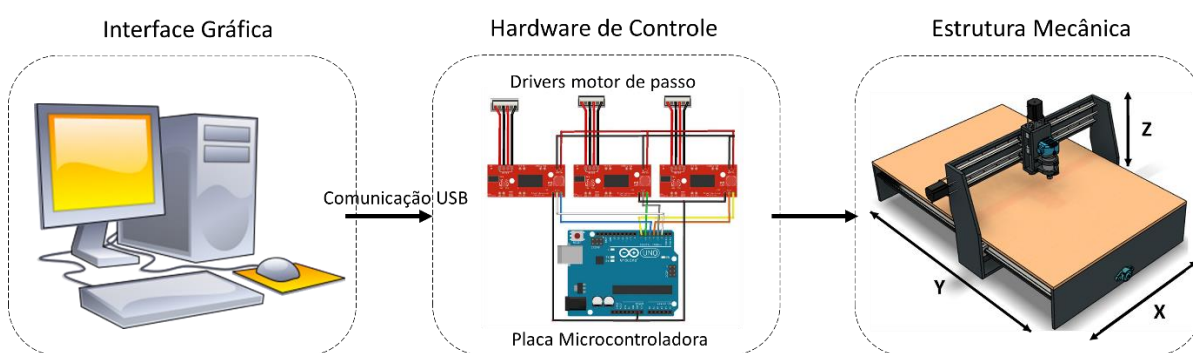
dessas máquinas exige uma assistência técnica cara e especializada com peças de reposição por vezes importadas, tornando alto o custo de implantação e manutenção, o que dificulta o investimento por parte de micro e pequenas empresas.

Com o intuito de criar uma opção viável para micro e pequeno empresário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo modelo de uma máquina CNC de baixo custo para corte e gravação, objetivada para utilização em empresas dos ramos de *design* gráfico, joias, artesanato, madeira, plástico e outras.

Primeiramente, objetivou-se o projeto e construção da estrutura mecânica da máquina com possibilidade de movimentação em três dimensões (X, Y e Z). Em seguida, foram desenvolvidos os drivers de acionamento dos motores de passo utilizados na movimentação da máquina. A partir dessa estrutura, foi desenvolvida uma interface gráfica computacional para controle e supervisão da máquina, a partir do uso de códigos CNC importados. Por fim, foi implementado um algoritmo de controle na placa microcontrolada, capaz de interpretar os comandos da interface gráfica e controlar os acionamentos do sistema proposto.

A Figura 1 é um diagrama simplificado do sistema proposto, contemplando seus principais recursos.

Figura 1 - Diagrama do sistema proposto.



Fonte: Autor, 2018

O presente trabalho foi dividido em capítulos. O Capítulo 2 abrange a fundamentação teórica necessária para entendimento das características e funcionalidades básicas de uma máquina CNC. O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do protótipo, citando os detalhes do projeto e tecnologias

implementadas no mesmo, especificando a estrutura mecânica, *hardware* de controle e interface gráfica de supervisão da máquina. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com o sistema em funcionamento. O Capítulo 5 expõe as considerações finais, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse trabalho demandou conhecimentos específicos das áreas de programação, eletrônica e mecânica. Para tanto, esse capítulo apresenta os conceitos de máquina CNC que foram empregados no desenvolvimento do protótipo.

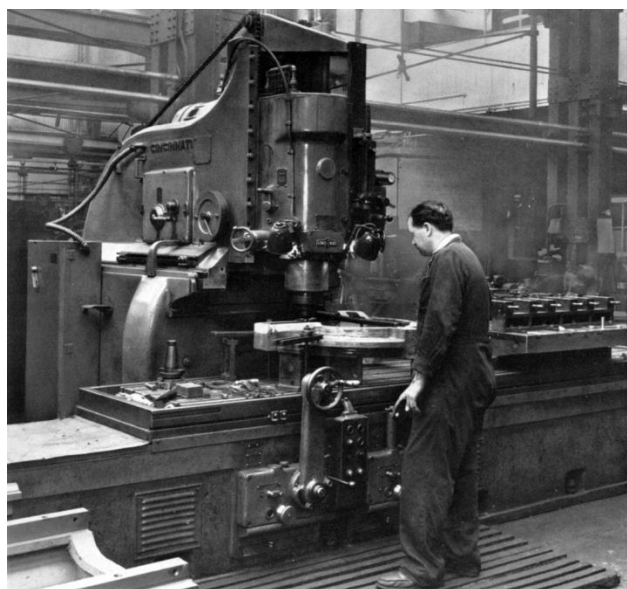
2.1 Comando Numérico Computadorizado (CNC)

A tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*) em português Comando Numérico Computadorizado, é basicamente uma forma de acionamento automática de máquinas ou dispositivos que necessitem controle de movimentos para executar suas funções. Para tanto, faz-se necessária a utilização de eletrônica com processadores ou microcontroladores em conjunto com memórias, onde o sistema de processamento recebe as informações em linguagem própria e compila as mesmas, transformando-as em impulsos elétricos enviados aos atuadores que executam a movimentação (PEREIRA, 2003).

Historicamente, o surgimento da tecnologia CNC ocorreu na década de 40 com John C. Parsons, proprietário da empresa Parsons Corporation, fabricante de componentes para aeronaves. John sentia a necessidade de uma máquina fresadora que executasse as operações de forma automática, pois as peças fabricadas em fresadoras demandavam muito tempo, por serem complexas e necessitarem de grande precisão dimensional. Então Parsons adicionou acionamentos à uma fresadora, tornando seu funcionamento automático via leitor de cartões perfurados, sistema então denominado de Digitron (FIGUEIRA, 2003).

Em 1949, a força aérea americana contrata Parsons para estudos e desenvolvimento de um sistema de controle para máquinas operatrizes, sendo esse estudo desenvolvido em parceria com o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) que sediou a criação de um laboratório de Servomecanismos. A Figura 2 é uma fotografia da fresadora de três eixos *Hydrotel* da fabricante *Cincinnati Milling Machine Company*, modelo semelhante ao que foi utilizado para o primeiro protótipo (SEAMES, 2002).

Figura 2 - Fresadora *Hydrotel* da *Cincinnati Company*.

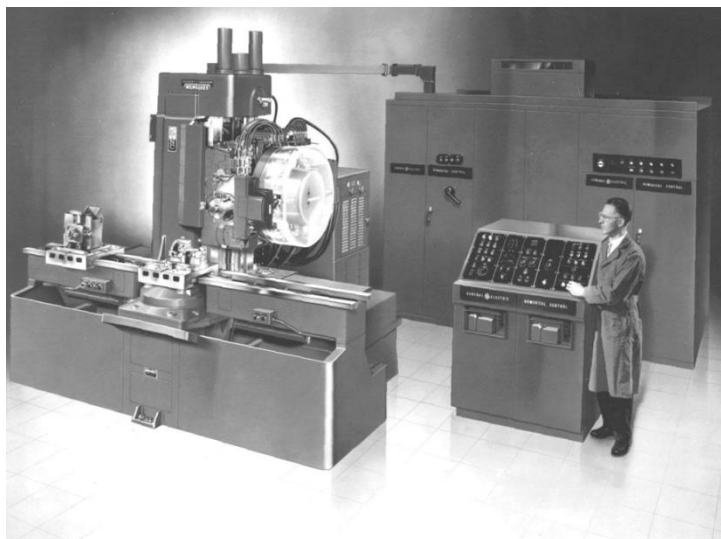


Fonte: <http://www.lathes.co.uk/dsgfactory002/>, 2018

A máquina sofreu grandes modificações, recebendo atuadores hidráulicos de velocidade variável para cada fuso de movimentação e um sistema de feedback com motores síncronos que transformavam movimento em sinal de tensão enviado para o sistema de controle (HILLIS, 2017).

No ano de 1951, o sistema foi completamente montado para o início dos estudos que duraram até 1953. Só em 1955 a nova tecnologia, denominada pelo MIT de NC (*Numeral Control*) em português Controle Numérico, foi disponibilizada para a indústria (HILLIS, 2017). Na Figura 3 pode ser verificado o protótipo desenvolvido na época, o qual possuía armários de controle maiores que a própria máquina.

Figura 3 - Protótipo da primeira máquina CN.



Fonte: Hillis S., 2018

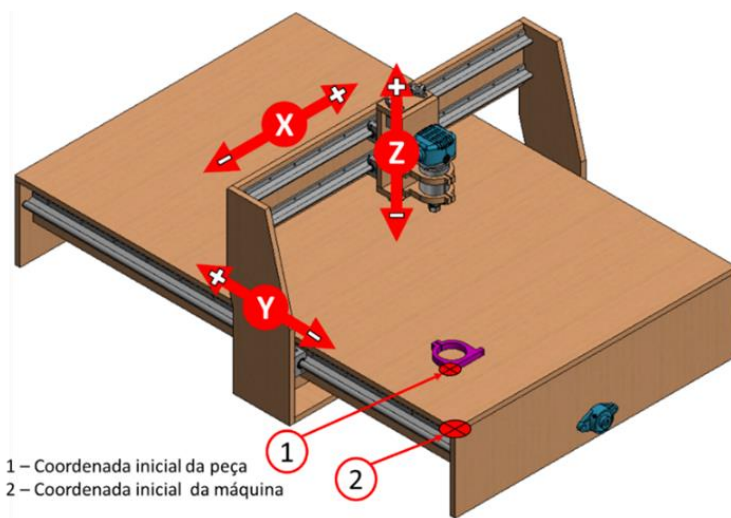
Após a disseminação da nova tecnologia, diversos fabricantes surgiram, cada qual com sua linguagem de programação própria, dificultando a operação de diferentes máquinas. Então, em 1958 a EIA (Electronic Industries Association), após estudos para a padronização da linguagem, criou um padrão chamado de EIA – 244 ou ASCII (American Standard Code for Information Interchange) em português Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações (NAVARRO, 1991).

2.1.1 Coordenadas e referências CNC

As máquinas CNC usam informações geométricas da peça inserida em um sistema de coordenadas cartesianas. As coordenadas da máquina precisam de um referencial para poder percorrer as dimensões da peça de forma correta. Esse referencial pode ser a coordenada inicial da máquina ou a coordenada inicial da peça (SMID, 2008).

A Figura 4 ilustra uma fresadora CNC do tipo *Router* com possibilidade de movimentação em três eixos cartesianos X, Y e Z. O (Item 2) da Figura 4 mostra a coordenada inicial da máquina que é algo intrínseco de sua construção, e o (Item 1) representa a coordenada inicial da peça, a qual pode ser alterada de acordo com a posição da peça.

Figura 4 - Coordenadas X, Y, Z e pontos de referência de uma fresadora CNC.

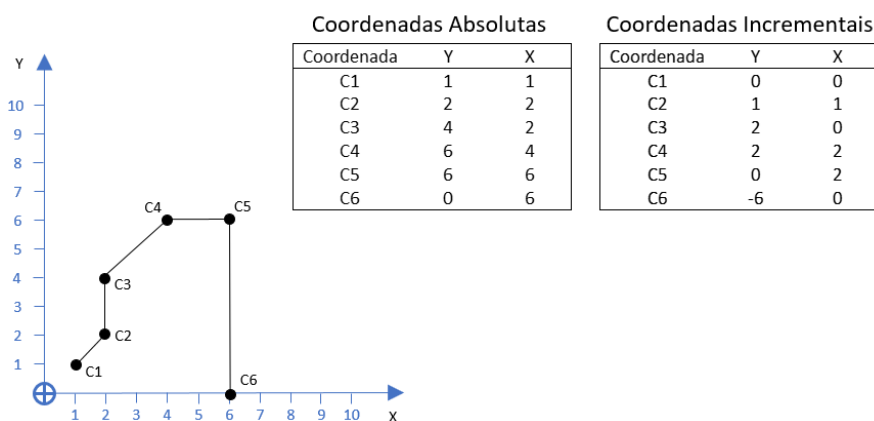


Fonte: Autor, 2018

Na programação CNC, os valores de coordenadas podem ser referenciados de dois modos distintos, sendo referencial absoluto ou incremental. No referencial absoluto, a referência será sempre um único ponto fixo que pode ser a coordenada inicial da máquina ou da peça. Já no referencial incremental ou relativo, a referência será sempre reiniciada a cada novo movimento, ou seja, depois de efetuar um comando de deslocamento, o novo ponto atingido será a nova referência para as próximas coordenada (COSTA, 2006) e (SMID, 2008).

A Figura 5 demonstra uma trajetória com suas respectivas coordenadas nos modos absoluto e incremental.

Figura 5 - Coordenada absoluta e incremental.

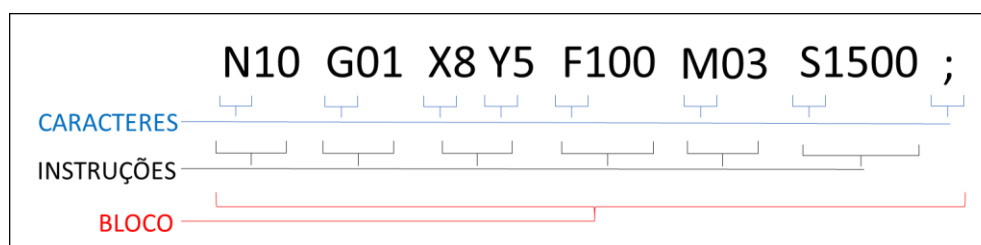


Fonte: Autor, 2018

2.1.2 Programação CNC

Um programa CNC é uma sequência de códigos que descreve as funções que a máquina deve desenvolver para construção da peça. O código é escrito em blocos, onde cada bloco representa uma linha de programação. Como pode ser verificado na Figura 6, os blocos são compostos por instruções ou também chamadas de palavras que indicam a posição do eixo, velocidade, comandos preparatórios e miscelâneas. (COSTA, 2006).

Figura 6 - Estrutura de um bloco de programação.



Fonte: Autor, 2018

As instruções, por sua vez, são compostas por caracteres ou também chamados de endereços que são os números, letras e símbolos. Na Tabela 1 estão listados os caracteres de maior utilização em programação CNC.

Tabela 1 - Lista de caracteres mais utilizados em programação CNC.

Caractere	Significado
O	Número do programa
N	Número da linha (bloco)
G	Função preparatória
X	Movimento no eixo X
Y	Movimento no eixo Y
Z	Movimento no eixo Z
I	Distância incremental paralela ao eixo X
J	Distância incremental paralela ao eixo Y
K	Distância incremental paralela ao eixo Z
R	Raio da trajetória da ferramenta
M	Função miscelânea
H	Altura da ferramenta

Caractere	Significado
T	Número da ferramenta
S	Rotação do eixo-árvore
F	Avanço
P	Número de um subprograma
.	Ponto decimal
()	Comentário do programa ou mensagem
%	Fim do programa
; ou #	Fim de bloco

Fonte: Adaptado em 15/04/2018 de Costa, 2006

As instruções do tipo G (preparatórias) e M (miscelâneas) são a base de um programa CNC. As instruções G têm a função de preparar a máquina para poder executar movimentos de maneira pré-definida e reconhecer unidades de medida. São funções que envolvem a movimentação da máquina, como unidade de medida de trabalho, referência da máquina, entre outros, que podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Instruções tipo G (preparatórias) mais utilizadas em programação CNC.

Caractere	Significado
G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular horária
G03	Interpolação circular anti-horária
G04	Tempo de espera
G17	Seleção plano XY
G18	Seleção plano ZX
G19	Seleção plano YZ
G20	Programação em sistema Inglês (Polegada)
G21	Programação em sistema Internacional (Métrico)
G27	Verificar ponto zero da máquina
G28	Retorna ao ponto zero da máquina (Referência 1)
G29	Verificar ponto zero da máquina
G30	Retorna ao ponto zero da máquina (Referência 2)
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro de ferramenta

Caractere	Significado
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (Esquerdo)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (Direito)
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (Positivo)
G44	Compensação do comprimento da ferramenta (Negativo)
G45	Compensação de posição – incremento simples
G46	Compensação de posição – decremento simples
G47	Compensação de posição – incremento duplo
G48	Compensação de posição – decremento duplo
G49	Cancelamento de <i>offset</i> de comprimento da ferramenta
G90	Sistema coordenadas absoluto
G91	Sistema de coordenadas incremental
G92	Deslocamento da origem do eixo
G94	Avanço dado em minutos
G95	Avanço por revolução

Fonte: Adaptado em 15/04/2018 de Costa, 2006

Já as funções M, conhecidas como miscelâneas, funcionam como interruptores de liga/desliga para controlar as funcionalidades da máquina, como ligar motor, troca de ferramenta e outros que podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Instruções tipo M (miscelâneas) mais utilizadas em programação CNC.

Caractere	Significado
M00	Parada programa
M01	Parada opcional do programa (Botão Stop)
M02	Fim programa sem reinício da memória
M03	Liga motor da fresadora sentido horário
M04	Liga motor da fresadora sentido anti-horário
M05	Desliga motor da fresadora
M06	Troca automática de ferramenta
M30	Fim do programa com reinício da memória
M98	Chama subprograma
M99	Encerra subprograma e volta ao programa principal

Fonte: Adaptado em 15/04/2018 de Costa, 2006

As instruções G podem ser divididas em modais e não modais. As funções modais são caracterizadas por serem gravadas na memória do programa, ou seja, quando utilizadas em um bloco de programação, os demais blocos subsequentes a utilizarão como referência, até que uma nova instrução modal seja utilizada ou o programa seja finalizado. Nas instruções não modais, a mesma deve ser utilizada em cada novo bloco que necessitar a instrução, não sendo gravada em memória do programa (COSTA, 2006).

Os comandos modais mais utilizados em programação:

- G(00) Posicionamento rápido
- G(01) Interpolação linear
- G(02) Interpolação circular de sentido horário
- G(03) Interpolação circular de sentido anti-horário
- G(20) Unidade de medida em polegada
- G(21) Unidade de medida em milímetro
- G(90) Sistema de coordenadas absoluto
- G(91) Sistema de coordenadas incremental

O código G(00) é utilizado para avanço rápido da ferramenta, onde a velocidade de avanço não é informada, sendo utilizada como padrão a maior velocidade da máquina. É normalmente utilizada no posicionamento da ferramenta no início do corte e em deslocamentos não produtivos durante o processo.

Já com G(01), o avanço se dá de forma linear em qualquer ângulo, podendo movimentar vários eixos simultaneamente, com velocidade programada pela instrução F. Normalmente utilizada em operações com formato geométrico retilíneo (SMID, 2008).

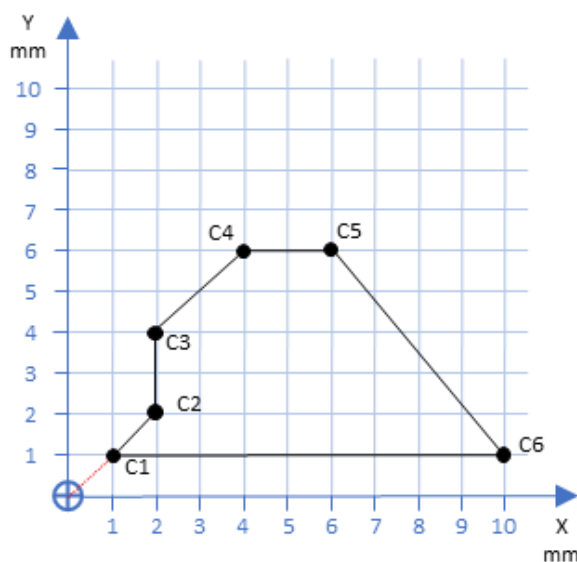
Na Tabela 4 e Figura 7 podem ser vistos, respectivamente, as linhas de código de um programa e a trajetória executada pela máquina, utilizando alguns dos códigos anteriormente mencionados.

Tabela 4 - Exemplo de programa interpolação linear.

Bloco	Operação
G21	Define unidade de medida milímetro
G90	Define modo de coordenada absoluto
M03	Aciona motor ferramenta
G00 X1.0 Y1.0 Z0.0	Avanço rápido para C1
G01 X2.0 Y2.0 F100	Avanço linear para C2 com velocidade de 100 mm/min
G01 Y4.0	Avanço linear para C3
G01 X4.0 Y6.0	Avanço linear para C4
G01 X6.0	Avanço linear para C5
G01 X10.0 Y1.0	Avanço linear para C6
G01 X1.0 Y1.0	Avanço linear para C1
M05	Desliga motor ferramenta
M02	Fim programa

Fonte: Autor, 2018

Figura 7 - Trajetória do programa da Tabela 4.



Fonte: Autor, 2018

As instruções $G(02)$ e $G(03)$ são utilizadas para movimentos circulares em sentido horário e anti-horário. Para tanto, é necessário informar para o programa as coordenadas do ponto final e central do arco. O centro do arco deve ser informado pelos caracteres I, J e K que são paralelos às coordenadas X, Y e Z, avaliando ainda o sistema de coordenada utilizado.

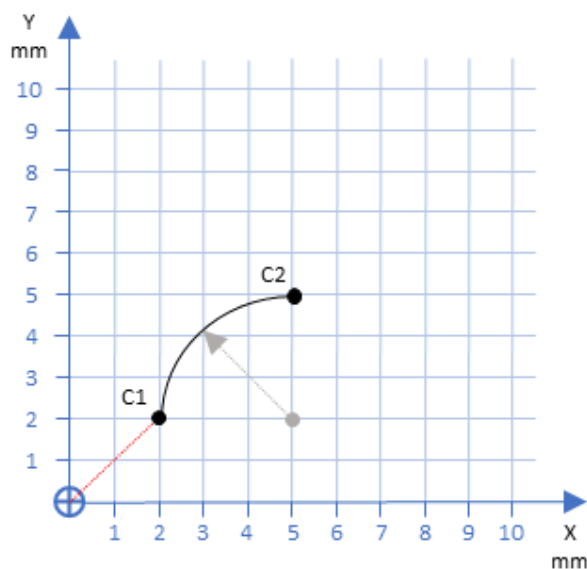
Se for utilizado o sistema absoluto, I, J e K usarão como referência o ponto zero. Mas se for sistema incremental, I, J e K terão como referência o ponto de início do arco (COSTA, 2006). Na Tabela 5 e Figura 8 pode-se verificar um exemplo de programa com interpolação circular.

Tabela 5 - Exemplo de programa interpolação circular.

Bloco	Operação
G21	Define unidade de medida milímetro
G90	Define modo de coordenada absoluto
M03	Aciona motor ferramenta
G00 X2.0 Y2.0 Z0.0	Avanço rápido para C1
G02 X5.0 Y5.0 I5.0 J2.0 F100	Avanço circular para C2 com velocidade de 100 mm/min
M05	Desliga motor ferramenta
M02	Fim programa

Fonte: Autor, 2018

Figura 8 - Trajetória do programa da Tabela 5.



Fonte: Autor, 2018

2.1.3 Mercado de CNC

Como visto no capítulo 1, as máquinas CNCs são muito utilizadas nos processos de corte e gravação de diferentes indústrias. Com isso, as características construtivas das máquinas disponíveis no mercado podem variar de acordo com fabricante ou processo a que se destinam. Com o intuito de demonstrar as principais características e comparativo de preços de venda, foram levantados três modelos de máquinas CNCs de diferentes fabricantes, ambas desenvolvidas para processamento de madeira, plástico e materiais macios.

O primeiro modelo, apresentado na Figura 9, é da fabricante Distritec, desenvolvida para trabalhos com madeira, MDF, acrílico, resinas, PVC e materiais macios. Segundo a fabricante, a precisão pode variar de acordo com o material, qualidade da fresa e modo de operação, normalmente apresentando variação de 0,1 até 1mm (Distritec, 2018). A máquina contempla a estrutura mecânica, quadro eletrônico com todo *hardware* de controle e motor ferramenta, mas a interface gráfica de operação disponibilizada pelo fabricante vem na versão demonstração, possuindo algumas limitações no número máximo de linhas de código para cada programa executado (ArtSoft, 2018).

Figura 9 - Router CNC RC0807 - Distritec



Fonte: Adaptado em 27/10/2018 de Distritec, 2018

Outra máquina pesquisada foi a CNC Hobby, fabricada pela CompuSoftware-BR e desenvolvida para os segmentos de marcenaria, mecânica, artesanato, arquitetura e outros. Os pontos mais relevantes desta máquina são a estrutura construída em chapas de MDF e a utilização de dois motores de tração para o eixo Y, o qual recebe a maior carga (CompuSoftware-BR, 2018). Na Figura 10 pode ser verificada a forma construtiva da máquina e as principais características da mesma.

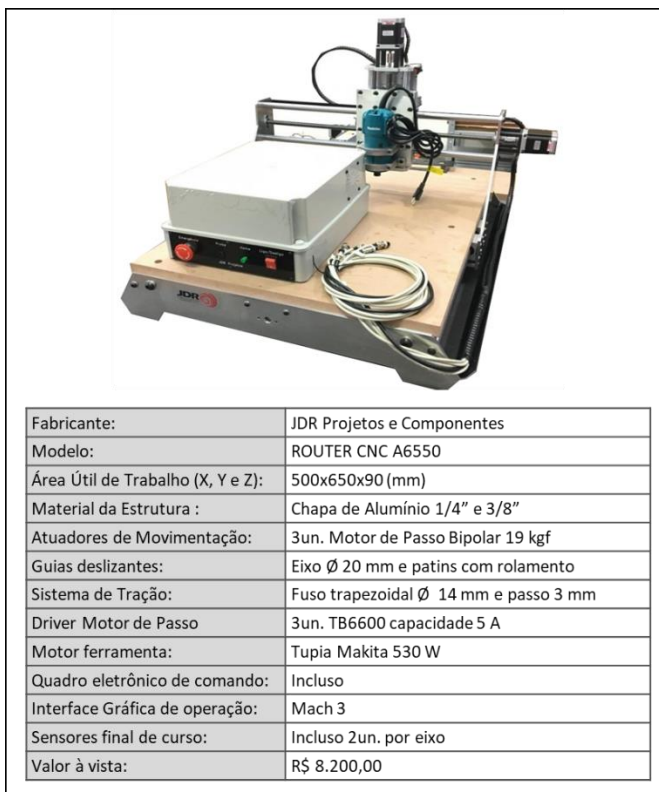
Figura 10 - CNC Hobby v2.0 - CompuSoftwareBR



Fonte: Adaptado em 27/10/2018 de CompuSoftware-BR, 2018

Por fim, a Figura 11 demonstra a última CNC avaliada neste trabalho. Fabricada pela JDR projetos e componentes, sua aplicação é voltada para usinagem de placas de circuito impresso, MDF, compensados, madeiras em geral, acrílico, PVC, ACM, plásticos, entre outros materiais. Suas principais características são: capacidade de usinagem de peças em 2D e 3D, ferramenta *probe* para autorreferênciação do eixo Z, sistema de tração por fuso trapezoidal e estrutura em chapa de alumínio. (JDR Projetos e componentes, 2018).

Figura 11 - Router CNC A6550 - JDR Projetos e componentes.



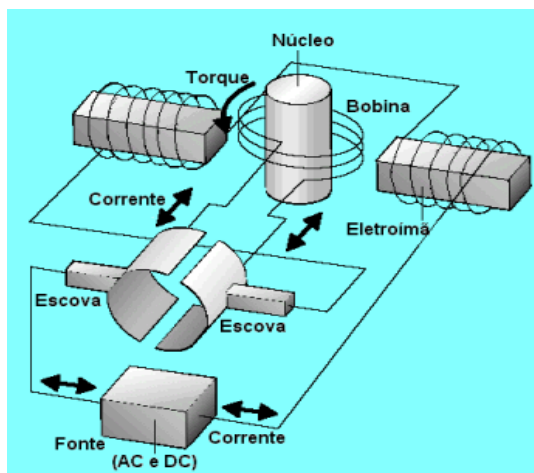
Fonte: Adaptado em 27/10/2018 de JDR Projetos e Componentes, 2018

Dentre os modelos levantados, as diferenças mais tocantes entre eles são: área útil de trabalho, potência do conjunto motor *driver*, sistema de tração, material e forma construtiva. Os valores das duas primeiras são bem parecidos, já a última possui um valor mais elevado devido a maior potência dos motores e utilização de fusos trapezoidais para tração.

2.2 Motor Universal

Motores universais possuem como característica principal a possibilidade de funcionar com corrente alternada *AC* ou corrente contínua *DC*. Isso só é possível graças a sua forma construtiva. Basicamente, esse tipo de motor utiliza eletroímãs no rotor e estator da máquina, interligados em serie por comutadores e escovas de carvão, como pode ser vistos na Figura 12.

Figura 12 - Modelo de motor universal.



Fonte: Netto, 2005

Sua característica é de alto torque de partida e altas velocidades de funcionamento. O sentido de giro só pode ser alterado se os terminais das bobinas do estator forem invertidos. Suas principais aplicações são em tupias, furadeiras, esmerilhadeiras, batedeiras, máquinas de costura e outros (NETTO, 2005).

2.3 Motor de Passo

Motores de passo são dispositivos eletromecânicos com propriedades de transformar pulsos elétricos em movimento rotacional discreto, com resolução angular predefinida, não necessitando de realimentação na sua malha de controle (CONSTANDINOU, 2003). A Figura 13 mostra um exemplo de motor de passo.

Figura 13 - Motor de passo.

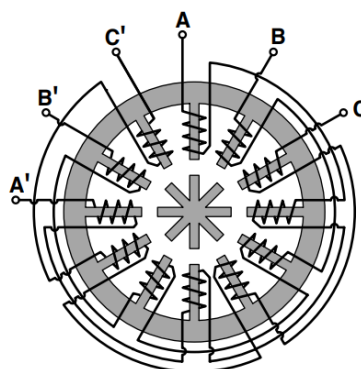


Fonte: Eletru's componentes eletrônicos, 2018

Os motores de passo podem ser classificados em três tipos, os quais são abordados nesta seção. Relutância variável é o tipo de motor de passo mais básico, possui rotor de material ferro silício com duas ou mais extremidades e estator também em ferro silício, envolvido por bobinas que geram campo eletromagnético ao serem energizadas.

Em funcionamento, as saliências do rotor tendem a alinhar-se com os polos do estator energizados, diminuindo a relutância, ou seja, o entreferro. Por não possuir ímãs, o rotor não gera magnetização permanente, sendo possível rodá-lo livremente quando não energizado, sem torque de retenção, o que inviabiliza sua aplicação com carga inercial grande. Por esse motivo, é pouco aplicável para fins industriais, sendo mais utilizado em sistemas de baixo torque (SOUZA M., 2007). Na Figura 14 pode ser verificada uma ilustração deste tipo de motor.

Figura 14 - Motor de passo relutância variável.

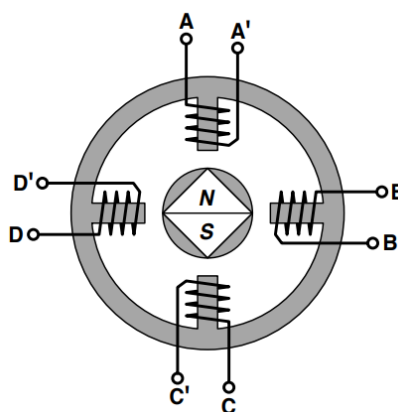


Fonte: Constandinou, 2003

Já o motor do tipo ímã permanente possui rotor com propriedade magnética permanente e estator de ferro silício envolvido por bobinas. O campo magnético gerado no estator reage com o magnetismo fixo do rotor, repelindo ou atraindo de modo a mover o rotor. Por possuir magnetismo fixo no rotor, este tipo de motor tem maior torque se comparado ao de relutância variável.

Também possui torque estático que possibilita a retenção de pequenos torques mesmo desenergizado, podendo ser aplicado em máquinas que dependem de posicionamento mesmo desenergizadas. Possui baixa resolução angular, entre 45° e 90° que podem ser aumentadas com técnicas de acionamento (VIVALDINI, 2009). A Figura 15 é uma simplificação do motor.

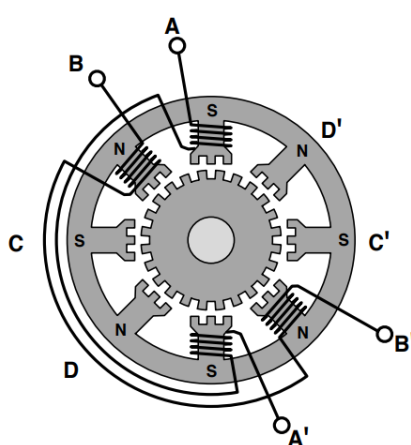
Figura 15 - Motor de passo ímãs permanentes.



Fonte: Constandinou, 2003

Por fim, o tipo híbrido é o motor mais utilizado pela indústria pois, se comparado ao demais tipos, possui maior resolução, geralmente entre $0,9$ e $1,8^\circ$, maior precisão, em média 3%, torque superior e tamanho reduzido. Sua construção é baseada nas duas tecnologias anteriormente apresentadas, por isso é nomeado como híbrido (VIVALDINI, 2009). A Figura 16 mostra uma vista em corte do motor híbrido.

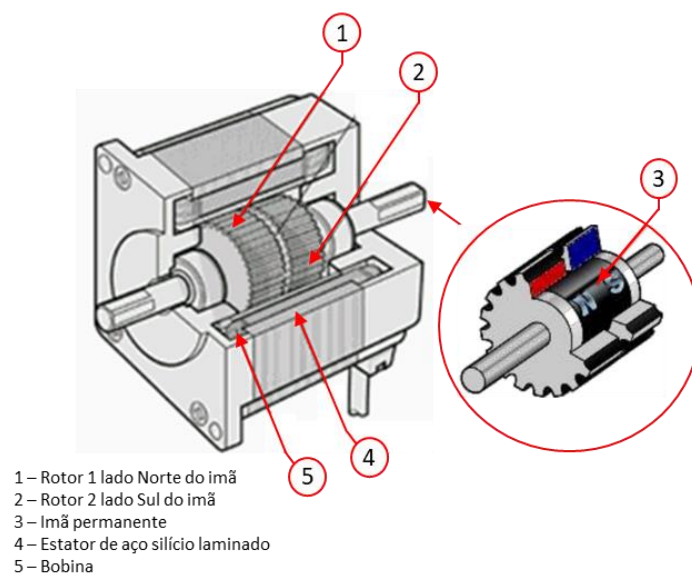
Figura 16 - Motor de passo híbrido.



Fonte: Constandinou, 2003

Os motores híbridos possuem rotores característicos em formato de engrenagem, construídas em ferro silício laminado. São sempre dispostas em um ou mais pares de engrenagens, conforme demonstra o (Item 3) da Figura 17. Cada engrenagem fica posicionada em uma extremidade do ímã, polarizando uma engrenagem como norte e outra em sul, (Itens 1 e 2) da Figura 17 e Figura 18.

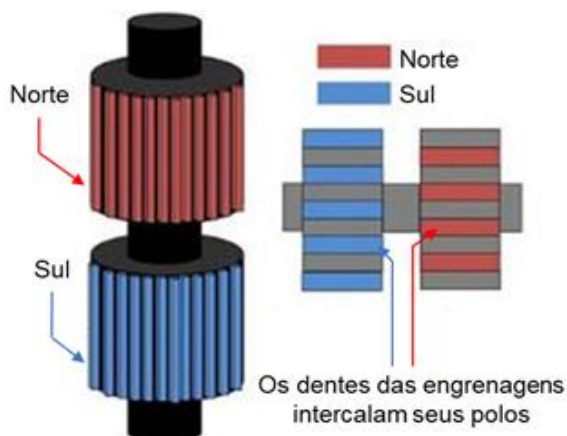
Figura 17 - Vista em corte motor de passo híbrido.



Fonte: Adaptado em 08/04/2018 de http://www.profelectro.info/wp-content/uploads/ft10_2.gif

Outro ponto característico deste motor é o desalinhamento entre as engrenagens, intercalando os polos, o que garante maior torque e resolução, vide Figura 18 (VASQUES; ROSTIROLLA, 2015).

Figura 18 - Características rotor motor de passo híbrido.

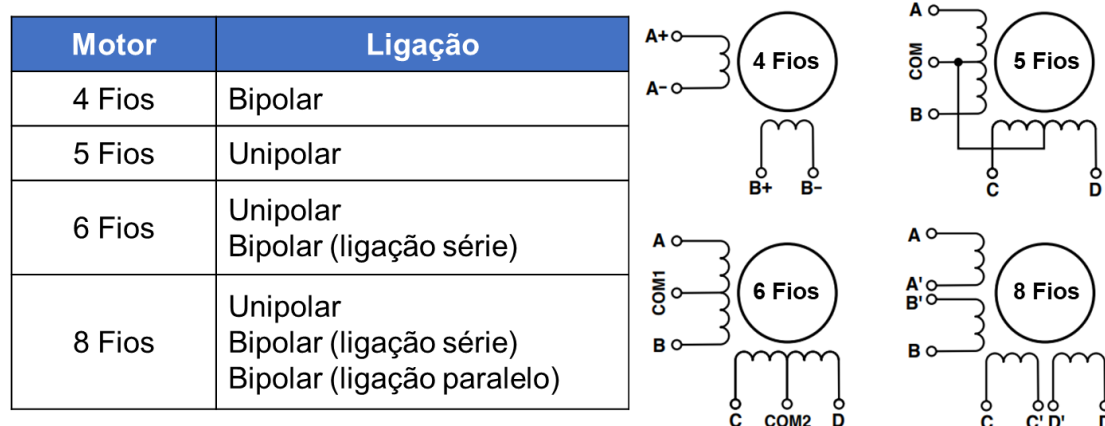


Fonte: Adaptado em 08/04/2018 de Vasques; Rostirolla, 2015

2.3.1 Modo de operação

Os motores de passo podem ser acionados de diferentes modos. O modo unipolar pode ser utilizado em motores que disponham de cinco, seis ou oito terminais de ligação, conforme pode ser verificado na Figura 19. Apesar da diferença na quantidade de fios de ligação, a estrutura é a mesma, o diferencial é que o fabricante escolhe deixar ou não os terminais expostos para o usuário selecionar o modo de operação e métodos de acionamento (CONSTANDINOU, 2003).

Figura 19 - Número de fios e tipos de ligações motores de passo.

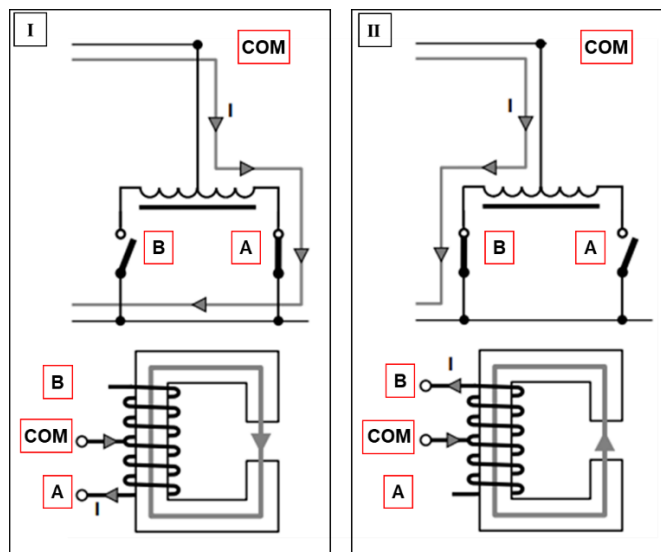


Fonte: Adaptado em 08/04/2018 de Constandinou 2003

Uma característica importante do modo unipolar é que a ligação deve ter uma derivação central, ou seja, junção de dois terminais, um de cada bobina, onde a derivação recebe alimentação de potencial positivo e as outras duas pontas são ligadas alternadamente ao potencial negativo, ocasionando a inversão do sentido do campo eletromagnético gerado pelos dois enrolamentos, sem a necessidade de inversão da corrente da fonte, o que facilita o acionamento sem a necessidade de um sistema de comutação mais elaborado (BRITES; SANTOS, 2008).

Na Figura 20 pode ser verificado que no (Instante I) a corrente flui do (COM) para bobina (A) e no (Instante II) a corrente flui do (COM) para bobina (B). A maior desvantagem do modo unipolar, é o fluxo de corrente em apenas metade de cada enrolamento, o que reduz o seu conjugado final.

Figura 20 - Modo de operação unipolar.



Fonte: Adaptado em 08/04/2018 de Constandinou, 2003

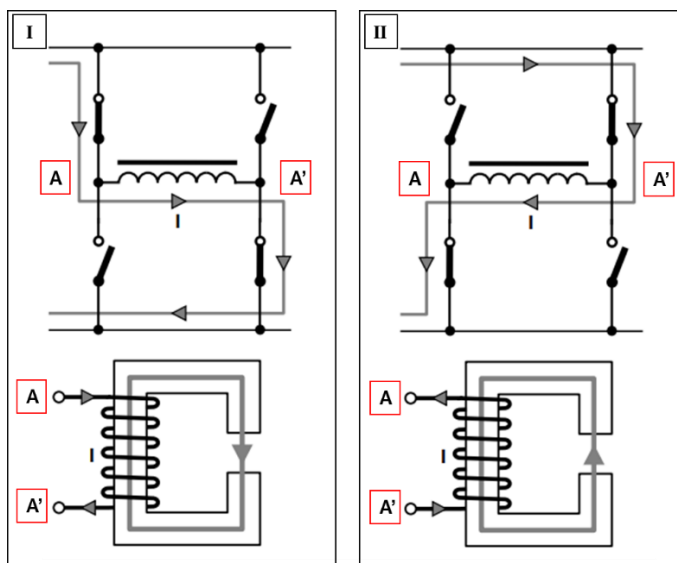
Já o modo bipolar pode ser utilizado em dispositivos que disponham de quatro, seis ou oito terminais de ligação, como visto anteriormente na Figura 19. Da mesma forma que os unipolares, os bipolares variam o número de terminais de ligação dependendo do fabricante e modelo. O nome bipolar vem da sua funcionalidade, que depende de inversão de polaridade das bobinas, gerando dois polos diferentes.

Para o motor girar, é necessária a inversão de polaridade de cada bobina de forma ordenada, ou seja, inverter o sentido da corrente que flui pelas bobinas. Desta forma, se faz necessária a utilização de um controlador que inverta a polaridade da tensão sobre as bobinas, de forma sequencial.

Na prática, são utilizados dois circuitos pontes H, um para cada bobina, conforme é ilustrado na Figura 21. O circuito ponte H utiliza quatro chaves ou transistores que são acionadas de modo a alternar o sentido da corrente sobre as bobinas. Mais detalhes do circuito ponte H serão vistos na seção 2.4.

O modo bipolar precisa de uma lógica de controle maior e mais complexa se comparada ao unipolar, mas em contrapartida, seu conjugado é maior (SOUZA M., 2007).

Figura 21 - Modo de operação bipolar com ponte H.



Fonte: Adaptado em 08/04/2018 de Constandinou, 2003

2.3.2 Modos de acionamento

Modo de acionamento é definido como a forma e sequência em que as bobinas do motor serão acionadas. São vários os modos, mas os mais comuns e utilizados são o de passo completo e meio passo. O modo passo completo pode ser dividido em dois, sendo o de simples excitação de fase (*wave drive*) e dupla excitação de fase (*full step*) (VIVALDINI, 2009).

Simple excitação de fase consiste no acionamento de apenas uma das fases a cada passo dado, de forma que o polo do rotor fique alinhado ao polo do estator, conforme Figura 22, onde também pode ser verificada a sequência de acionamento das bobinas e movimento do rotor. Esse acionamento é caracterizado por consumir menos energia, pois aciona menos bobinas simultaneamente, o que, em contrapartida, diminui drasticamente o torque (SOUZA M., 2007).

Figura 22 - Passo completo, simples excitação de fase (*wave drive*).

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1	Ligada	Desligada	Desligada	Desligada	
2	Desligada	Ligada	Desligada	Desligada	
3	Desligada	Desligada	Ligada	Desligada	
4	Desligada	Desligada	Desligada	Ligada	

Fonte: Goellner, 2006

Já na dupla excitação, são necessárias duas fases simultâneas para cada passo de rotação. A resolução permanece a mesma que a de simples excitação, porém o posicionamento tem uma alteração, pois o rotor será atraído por dois polos com mesma intensidade, gerando uma resultante entre os polos, conforme Figura 23. A resultante de duas fases gera um acréscimo de torque na ordem de 30% a 40%, se comparado ao modo de simples excitação (SOUZA M., 2007).

Figura 23 - Passo completo, dupla excitação de fase (*full step*).

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1	Ligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2	Desligada	Ligada	Ligada	Desligada	
3	Desligada	Desligada	Ligada	Ligada	
4	Ligada	Desligada	Desligada	Ligada	

Fonte: Goellner, 2006

O acionamento de meio passo tem o intuito de aumentar a resolução do ângulo de rotação, dobrando o número de passos necessários para completar uma revolução, garantindo um maior poder de posicionamento em relação aos outros métodos. Sua velocidade é reduzida pela metade e seu torque é variante entre um passo e outro, isso porque o número de polos acionados a cada passo alterna-se entre um e dois, o que causa uma perda de torque se comparado ao método de dupla excitação de fase (SOUZA M., 2007). A Figura 24 mostra a sequência de acionamento do modo de meio passo.

Figura 24 - Meio passo (*half step*).

Passo	Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Exemplo
1.a	Ligada	Desligada	Desligada	Desligada	
1.b	Ligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2.a	Desligada	Ligada	Desligada	Desligada	
2.b	Desligada	Ligada	Ligada	Desligada	
3.a	Desligada	Desligada	Ligada	Desligada	
3.b	Desligada	Desligada	Ligada	Ligada	
4.a	Desligada	Desligada	Desligada	Ligada	
4.b	Ligada	Desligada	Desligada	Ligada	

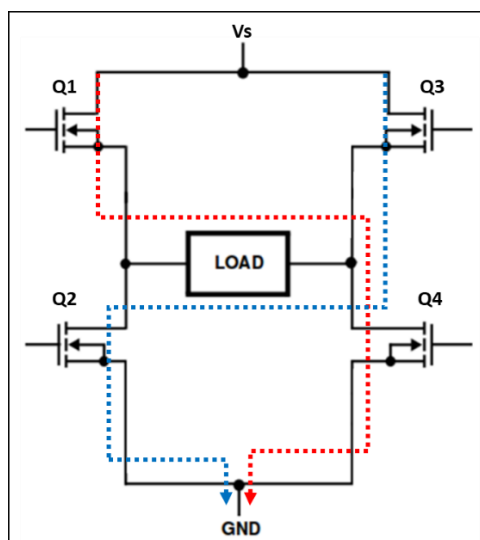
Fonte: Goellner, 2006

2.4 Circuito Ponte H

Como visto na seção anterior 2.3.1, o circuito ponte H utiliza quatro chaves ou transistores, criando um circuito de acionamento que permite a inversão de corrente nas bobinas do motor (VIVALDINI, 2009). Mas, para a utilização de circuito ponte H, alguns cuidados são fundamentais e arranjos eletrônicos devem ser criados para efetuar o acionamento da forma correta.

A Figura 25 demonstra um circuito ponte H, onde no primeiro momento (Q1) e (Q4) são acionados para condução da corrente em um sentido da bobina. Num segundo momento (Q1) e (Q4) são desligados e (Q3) e (Q2) são acionados para conduzir no sentido contrário, o que gera a reversão no sentido de giro do motor (MAIMON, 2004).

Figura 25 - Circuito ponte H.



Fonte: Adaptado em 14/05/2018 de Maimon, 2004

Mas um dos problemas gerado pelo acionamento direto dos transistores é o efeito *shoot-through*, que ocorre quando dois transistores do mesmo lado da ponte são acionados, no caso o par (Q1) e (Q2) ou o par (Q3) e (Q4). Esse efeito causa um curto circuito da fonte, interligando os terminais (V_s) com (GND), gerando uma grande corrente elétrica que pode danificar os transistores. O *shoot-through* ocorre, pois, o tempo de condução/corte (T_{off}) de um transistor é maior que o tempo de corte/condução (T_{on}), o que exige um circuito de retardo no acionamento dos

transistores e adição de diodos super-rápidos para diminuir o tempo de corte (T_{off}). Além disso, os transistores do tipo *FET* (*Field Effect Transistor*) possuem um acionamento (*gate*) muito sensíveis a altas tensões, sendo necessária a utilização de diodos para proteção (MAIMON, 2004).

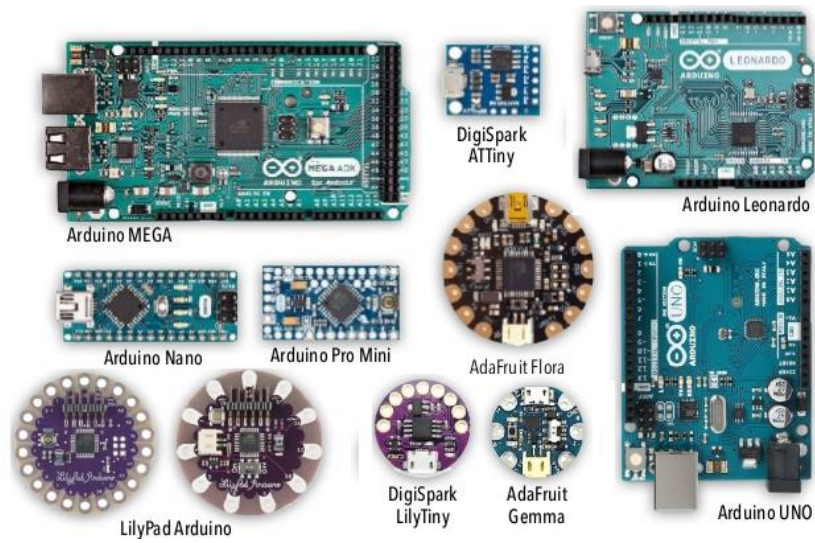
2.5 Placa Microcontroladora Arduino

Criado na Itália em 2005, o Arduino é uma placa microcontroladora desenvolvida para entusiastas, engenheiros, projetistas e estudantes utilizarem em protótipos e projetos eletrônicos. Baseia-se em *hardware* e *software* livres (*open source*), tendo como maiores propósitos ser uma plataforma de baixo custo e fácil utilização, podendo ser programada em *Windows*, *Linux* e *Mac OS* via *software* próprio, com linguagem similar a C e C++.

Uma das grandes vantagens do Arduino é sua extensa biblioteca de códigos e projetos disponibilizados pelas comunidades ligadas a plataforma, o que permite ao usuário programar o microcontrolador com linguagem de alto nível mesmo com pouco conhecimento em programação. Possui ainda entradas e saídas de sinais para leitura de sensores e acionamento de dispositivos, além de conexão USB para programação e monitoramento (RENNA, 2013).

Na Figura 26 estão as principais plataformas do Arduino disponíveis no mercado.

Figura 26 - Principais plataformas Arduino.



Fonte: Multilógica, 2018

3 DESENVOLVIMENTO

A finalidade deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo de máquina CNC de pequeno porte e baixo custo para utilização nos processos de corte e gravação em micro e pequenas empresas dos ramos gráfico, joias, artesanato, madeira, plástico, entre outras. Para tanto, as seções desse capítulo apresentam as etapas do desenvolvimento do *hardware* e do *software* que contemplam esta proposta.

3.1 Visão geral do sistema

Para desenvolvimento do projeto se fez necessária a construção de uma estrutura mecânica, três placas de acionamento para motores de passo (*drivers*), criação de uma interface com o usuário para controle do processo e desenvolvimento de algoritmo de controle para placa microcontroladora.

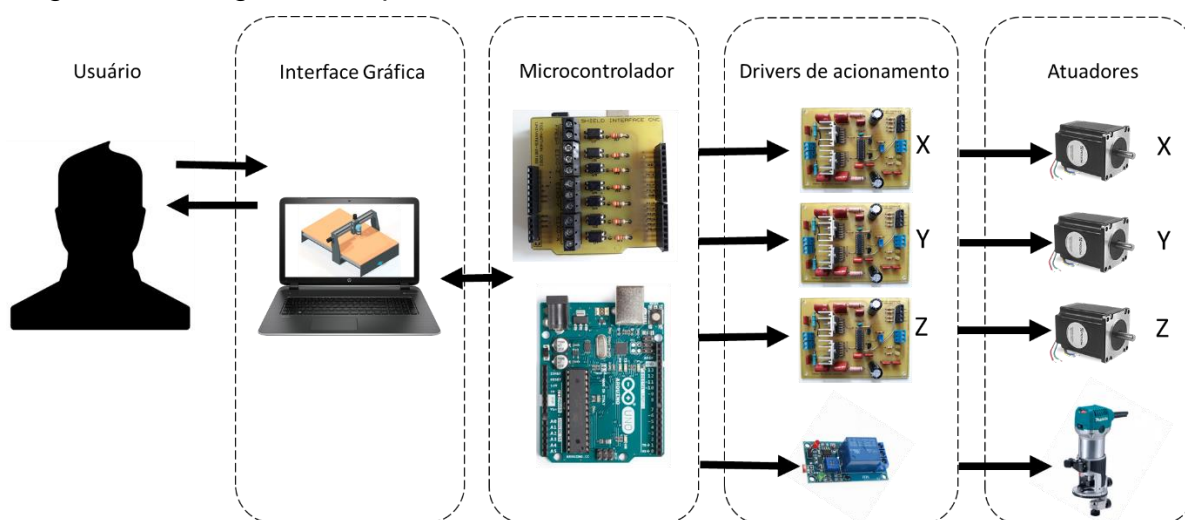
A estrutura mecânica foi construída para possibilitar o movimento da ferramenta em três dimensões (X, Y e Z), sendo essa estrutura composta por uma mesa fixa e pórtico que se movimenta sobre guias lineares, tracionado por conjunto fuso trapezoidal e motor de passo.

Como ponto central, a placa microcontroladora é responsável pela intercomunicação da interface gráfica, *drivers* de acionamento e sensores, convertendo e transmitindo informações entre *hardware* e *software*.

O controle dos motores de passo se dá via *drivers*, concebidos individualmente para cada motor, tendo a função de processar os comandos da placa microcontroladora e efetuar os acionamentos de sentido de giro, rotação do motor, proteção de sobrecorrente e modo de acionamento dos motores.

Por fim, a interface gráfica é o meio de comunicação entre o usuário e a máquina, permitindo efetuar configurações e ajustes, bem como acompanhar o processo em tempo real. Para melhor exemplificar, a Figura 27 mostra um breve diagrama do sistema desenvolvido.

Figura 27 - Diagrama simplificado do sistema.



Fonte: Autor, 2018

As seções a seguir detalham os componentes apresentados na Figura 27.

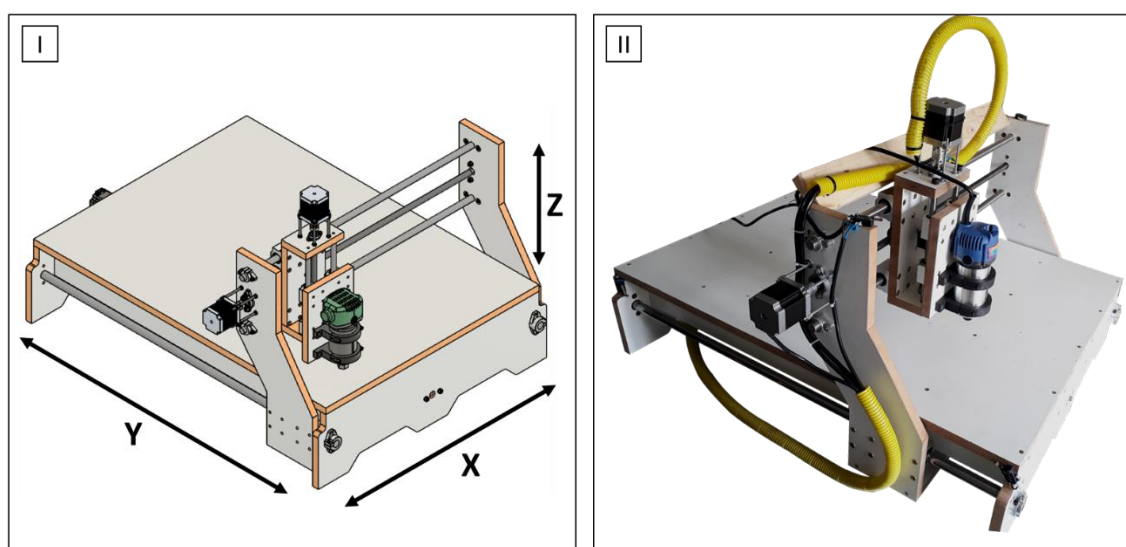
3.2 Estrutura mecânica

A máquina foi desenvolvida com área útil de trabalho de $X = 560$ mm, $Y = 770$ mm e $Z = 90$ mm, utilizando chapas de MDF de 18 mm e parafusos do tipo auto atarraxante para fixação das peças. O MDF foi escolhido por ser um material de

baixo custo e fácil manipulação, demandando menor custo de processamento se comparado com os metais. Apresentou uma boa rigidez mecânica para máquina deste porte, sendo uma boa opção para desenvolvimento do protótipo.

Na Figura 28 (Item I) pode ser visualizada uma simulação da máquina em *software* de desenvolvimento CAD 3D *Autodesk Inventor* e na Figura 28 (Item II) a estrutura mecânica já fabricada.

Figura 28 - Estrutura mecânica.



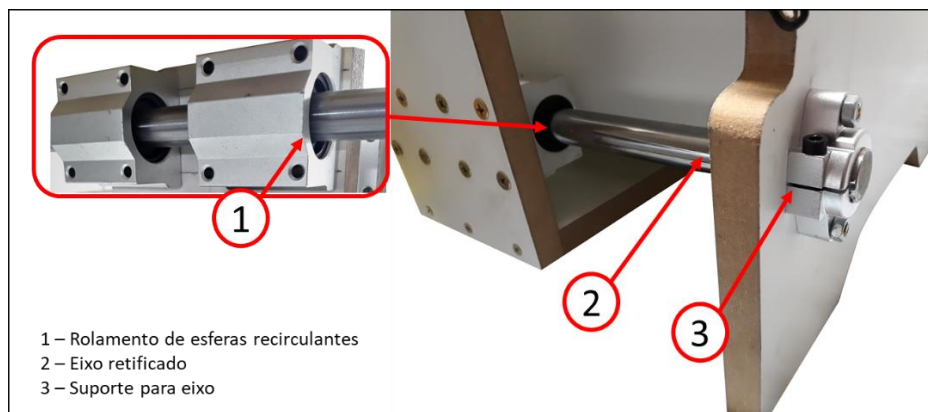
Fonte: Autor, 2018

3.2.1 Guia esférico linear

Para guiar as partes moveis da máquina, foram utilizados conjuntos de guias lineares e rolamentos de esferas recirculantes nos três eixos. Este tipo de guiamento foi selecionado por fornecer menor nível de atrito se comparado com buchas e sistemas deslizantes. Foram utilizados guias e rolamentos de Ø 20 mm, Ø 16 mm e Ø 12 mm para os eixos Y, X e Z respectivamente.

A Figura 29 apresenta os principais componentes do sistema de guia esférico linear.

Figura 29 - Guia esférico linear.



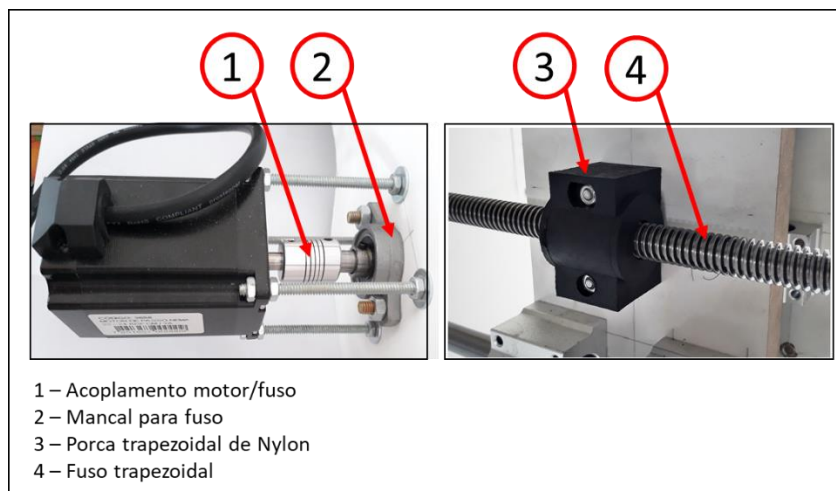
Fonte: Autor, 2018

3.2.2 Fuso trapezoidal

Para efetuar o movimento linear sobre as guias esféricas, optou-se pela utilização de fusos de roscas trapezoidais de $\varnothing 14$ mm passo 3 mm para os eixos X, Y e $\varnothing 11$ mm passo 2 mm para o eixo Z. Fusos são elementos que transformam movimentos circulares em movimento linear, sendo uma boa solução para transformar a rotação dos motores de passo em movimento linear. Outras tecnologias como fusos esféricos poderiam ser utilizados para obter maior desempenho da máquina, mas os fusos trapezoidais são uma solução mais barata e atenderam as características necessária para os trabalhos que a máquina se propos.

A Figura 30 detalha as peças fundamentais para a transmissão e fixação dos fusos trapezoidais.

Figura 30 - Fuso trapezoidal.



Fonte: Autor, 2018



Para transmitir o movimento do fuso para a máquina, foram utilizadas porcas trapezoidais em polímero *nylon*, fixadas nas partes moveis da máquina. Os fusos foram fixados na estrutura da máquina por mancais de rolamentos de \varnothing 10 mm, sendo dois mancais por eixo. Para unir o fuso ao motor de passo foram utilizados acoplamentos elásticos de alumínio, que auxiliam na compensação de possíveis desalinhamentos entre os eixos do motor e fuso.

3.2.3 Motores de passo

Para os eixos X e Z, foram utilizados motores bipolares NEMA 23 da marca WOTIOM, modelo WS23-0150-30-4 com resolução de 1.8° por passo, 3 A de corrente por fase e 15 kgf.cm de torque. No eixo Y, por receber uma carga maior, foi selecionado o motor bipolar NEMA 23, modelo WS23-0240-20-4 com resolução de 1.8° por passo, 2 A de corrente por fase e 24 kgf.cm de torque.

A maior diferença entre os modelos é o torque, que chega a ser 60% maior no modelo selecionado para o eixo Y. A Figura 31 relaciona as principais características de cada motor.

Figura 31 - Características motores de passo.

			
Padrão:	NEMA 23	Padrão:	NEMA 23
Modelo:	WS23-0150-30-4	Modelo:	WS23-0240-20-4
Ângulo de passo:	$1.8^\circ \pm 5\%$	Ângulo de passo:	$1.8^\circ \pm 5\%$
Corrente / Fase:	3.0 A	Corrente / Fase:	2.0 A
Tensão / Fase:	3.9 V	Tensão / Fase:	8.6 V
Nº de Fases:	2	Nº de Fases:	2
Resistência:	$1.3 \pm 10\% \Omega$	Resistência:	$4.3 \pm 10\% \Omega$
Resistência de isolamento:	100 MOhm (500 V DC)	Resistência de isolamento:	100 MOhm (500 V DC)
Indutância:	$2.2 \pm 20\% \text{ mH}$	Indutância:	$16.2 \pm 20\% \text{ mH}$
Classe de Isolação:	B	Classe de Isolação:	B
Holding Torque:	15 kgf.cm	Holding Torque:	24 kgf.cm

Fonte: Adaptado em 14/05/2018 de Wotiom 2018

Outro ponto importante, é a definição da resolução da máquina, sendo essa, calculada pela relação entre resolução do motor de passo e passo do fuso trapezoidal. A Equação (1) foi utilizada para definir a resolução.

$$R_m = \frac{P_f}{N_p} \quad (1)$$

Onde:

R_m é a resolução da máquina em [mm];

P_f é o passo do fuso em [mm];


N_p é o número de passos para completar uma volta;

Como os motores de passo são acionados no modo de passo completo *full step* e possuem resolução de $1,8^\circ$ por passo, para cada revolução são necessários 200 passos. Nos eixos X e Y que possuem fuso com passo de 3 mm/revolução a resolução é de 0,015 mm, já para o eixo Z com fuso de passo 2 mm a resolução é de 0,01 mm.

3.2.4 Motor ferramenta

Para efetuar o corte e gravação das peças, foi utilizada uma tupia da marca F&M modelo WT8001 com potência de 650W e rotação máxima de 32000RPM. A ferramenta de trabalho suportada pela tupia é de até 1/4" de diâmetro, sendo uma solução de baixo custo em comparação a motores *spindle*. Esta tupia utiliza motor universal. Mais detalhes da tupia podem ser verificados na Figura 32.

Figura 32 - Características tupia.

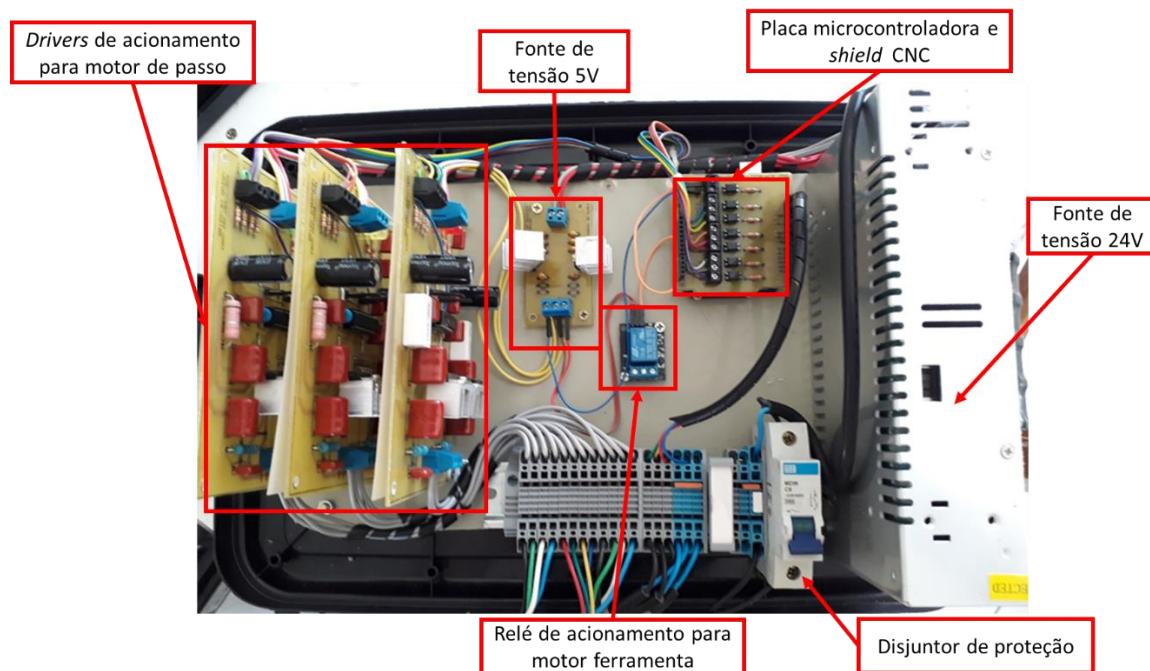
	Fabricante	F&M
	Modelo	WT8001
	Potência	650 W
	Corrente	3 A
	Tensão	220 V
	Frequência	50/60 Hz
	Rotação máx.	32000 RPM
	Ø Ferramenta	Ø6 mm ou 1/4"
	Profundidade máx. de corte	6 mm

Fonte: Adaptado em 14/05/2018 de Extra, 2018

3.3 Hardware de controle e acionamento

Para efetuar o controle e acionamento da máquina CNC, foram integrados diferentes *hardwares*, sendo placa de controle microprocessadora, sensores fins de curso, *drivers* de acionamento dos motores de passo e motor ferramenta. A Figura 33 demonstra o painel eletrônico finalizado, com a integração de todos os *hardwares* eletrônicos da máquina.

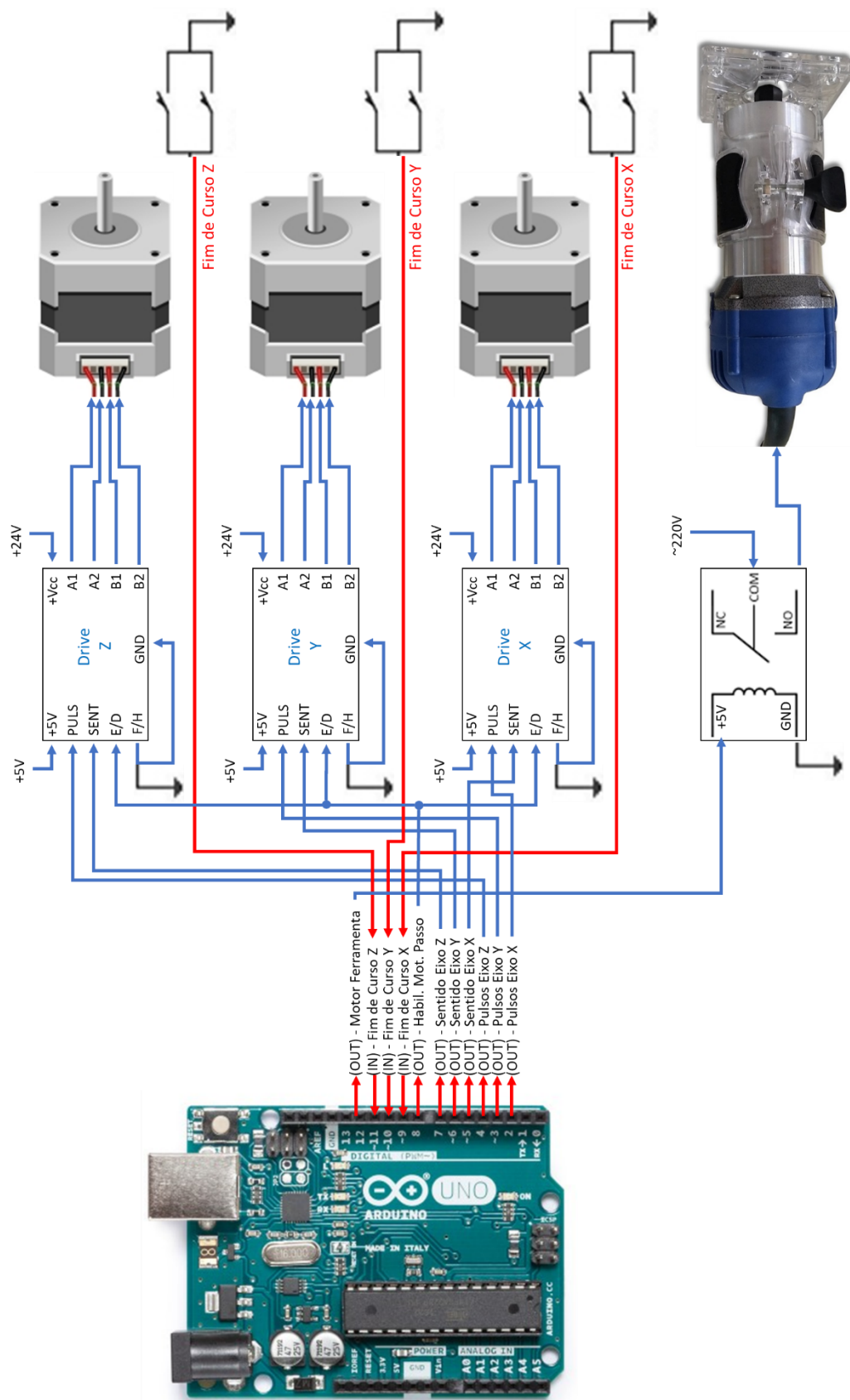
Figura 33 - Painele Eletrônico.



Fonte: Autor, 2018

Na Figura 34 foi elaborado um diagrama das conexões entre *hardwares* para melhor entender a interação entre eles.

Figura 34 - Diagrama de ligações do *hardware*.



Fonte: Autor, 2018

3.3.1 Placa microcontroladora

Na placa microcontroladora, foi carregado o algoritmo com a lógica de operação do sistema, sendo sua função efetuar cálculos e operações lógicas que convertem as informações recebidas dos sensores e interface gráfica, em sinais para acionamento dos motores de passo e motor ferramenta. Para implementar esse controle, a placa Arduino UNO foi a escolha ideal, por oferecer algumas facilidades.

A primeira delas é o suporte para comunicação USB, o que torna mais simples a intercomunicação entre Arduino, interface gráfica e computador, sem necessitar de algoritmos complexos para comunicação. Outra vantagem é a disponibilidade de portas digitais e analógicas que podem ser usadas como entradas e saídas, sendo 14 digitais e 6 analógicas. A placa Arduino UNO utiliza como microcontrolador o ATmega328P 8 bits.

Seguem abaixo algumas das principais características do ATmega328P:

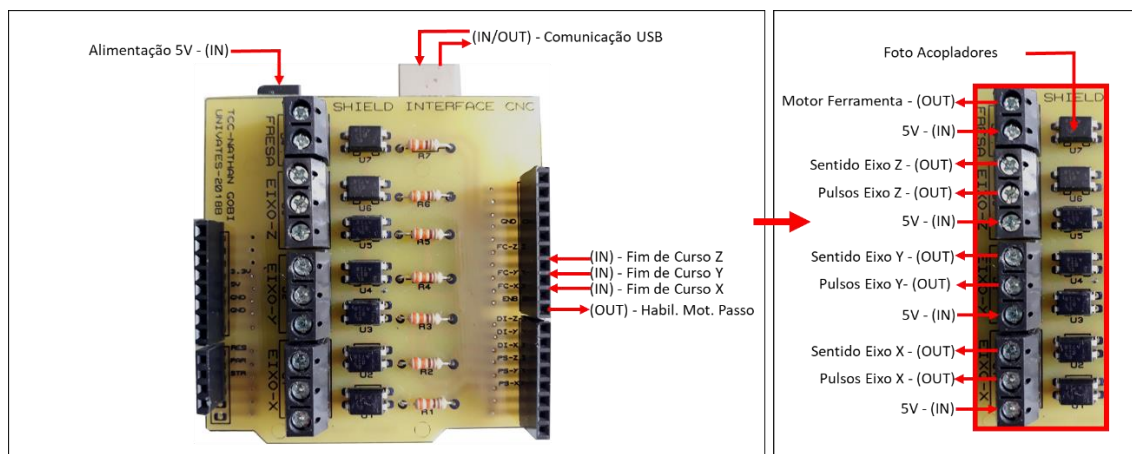
- 5 V tensão operacional (limite 6-20 V);
- 14 I/O pinos digitais (6 com suporte saída *PWM*, que simulam saídas analógicas);
- 6 pinos de entrada analógica;
- 20 mA corrente *DC* por pino;
- 32 kB memória *flash* (dos quais 0,5 kB usados pelo *bootloader*);
- 2 kB SRAM;
- 1 kB EEPROM;
- 16 MHz frequência;
- 2 *timers/counters* de 8 bits e 1 *timer/counter* de 16 bits;

Além das vantagens técnicas, o Arduino UNO é uma solução de baixo custo e de simples utilização, com conexões de fácil encaixe, sem necessidade de soldas.

Afim de se evitar uma possível sobrecarga ou sobretensão proveniente dos *drivers*, foi desenvolvida uma placa *shield* para interface de entradas e saídas do Arduino. A *shield* de interface CNC utiliza foto acopladores CIs EL817, que isolam o

microcontrolador dos demais circuitos. A Figura 35 apresenta a relação de entradas e saídas da *shield* de interface CNC.

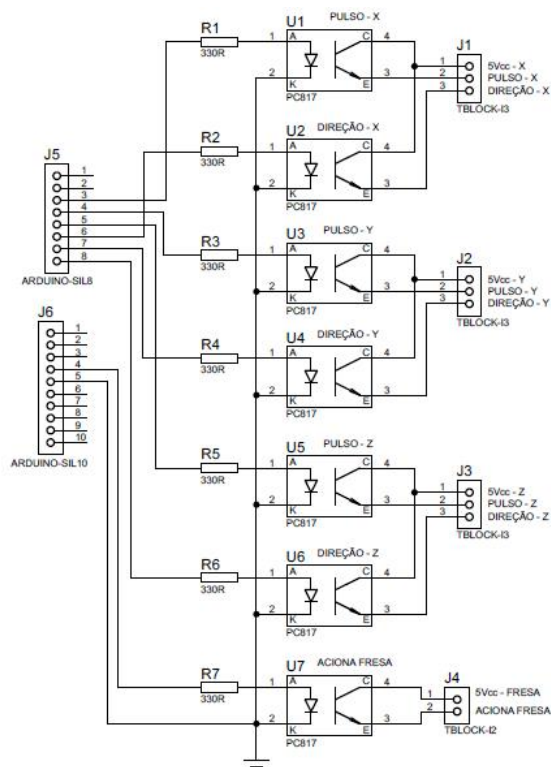
Figura 35 - *Shield* de Interface CNC.



Fonte: Autor, 2018

As entradas (FIM DE CURSO X, Y e Z) recebem sinal dos limitadores fim de curso dos três eixos. As saídas foto acopladas (HABIL.MOT. PASSO), (SENTIDO EIXO X, Y e Z) e (PULSOS EIXO X, Y e Z) são ligadas aos *drivers* de acionamento dos motores de passo. Para acionar o motor ferramenta a saída usada é a (MOTOR FERRAMENTA). A Figura 36 demonstra o circuito da CNC *shield*.

Figura 36 - Circuito da CNC shield.



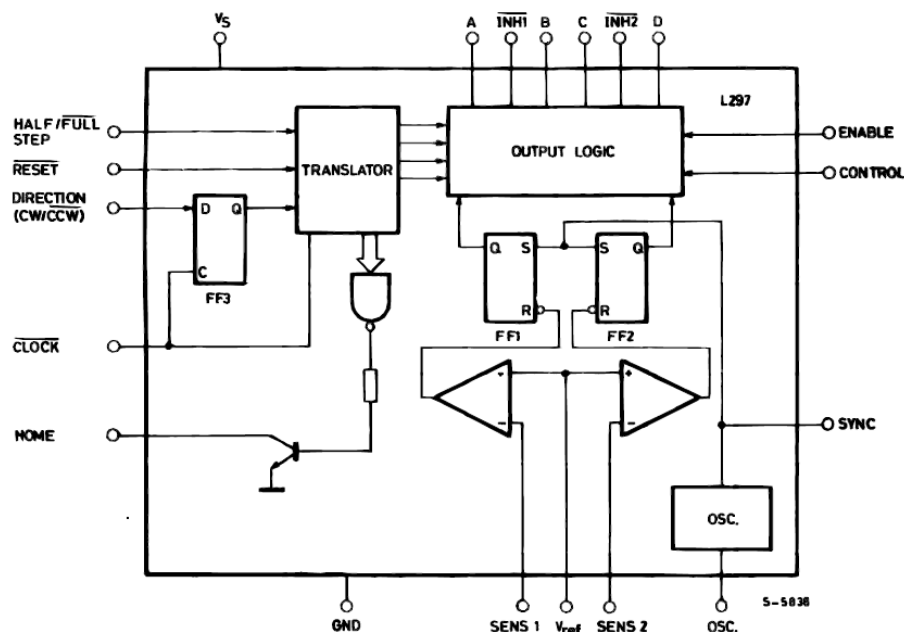
Fonte: Autor, 2018

3.3.2 Driver de acionamento motor de passo

Para acionar os motores de passo, foram confeccionadas três placas *driver* que controlam o sentido de giro, rotação do motor e protegem os motores contra sobrecorrente. No intuito de facilitar a construção dos *drivers* e obter um controle mais simplificado, foi utilizado como base o CI L297.

Este CI é desenvolvido pela STMicroelectronics, específico para o controle de motores de passo unipolares e bipolares, necessitando apenas os sinais de habilita (*ENABLE*), pulso (*CLOCK*), sentido de giro (*CW/CCW*) e modo de acionamento (*HALF/FULL*). A partir das entradas digitais, formam-se os quatro sinais de saída (*A*, *B*, *C* e *D*), respectivos ao acionamento das duas bobinas do motor de passo bipolar utilizado no projeto, além de dois sinais inibidores (*INH1* e *INH2*) que foram usados para cortar o acionamento de potência em caso de sobrecorrente. A Figura 37 apresenta as conexões externas e etapas internas do CI.

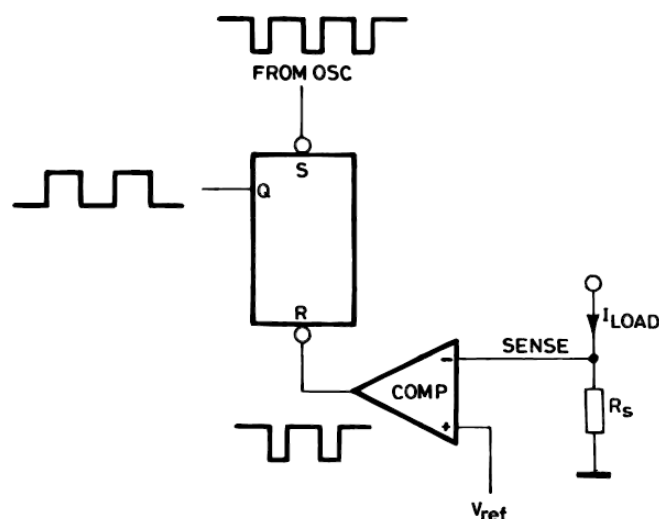
Figura 37 - Diagrama de blocos CI L297.



Fonte: STMicroelectronics, 2001

Outro ponto importante do L297 é o seu sistema de proteção de sobrecorrente. O CI trabalha com dois circuitos *chopper*, sendo um para saídas (A, B e INH1) e outro para (C, D e INH2), respectivos às duas bobinas do motor bipolar. O circuito *chopper* consiste em um comparador, um *flip-flop* e um resistor de carga externo (R_s).

A tensão no resistor de carga (R_s) é monitorada constantemente pelas entradas (SENS) e comparada com a tensão de referência (V_{ref}). Assim, quando a corrente na bobina do motor aumentar, a tensão no resistor (R_s) aumentará e, caso a tensão em (R_s) for maior que (V_{ref}), o *flip-flop* cortará a saída de acionamento das bobinas, efetuando a proteção de sobrecorrente no motor. A Figura 38 mostra a topologia do circuito *chopper*.

Figura 38 - Circuito *chopper*.

Fonte: STMicroelectronics, 2003

Para encontrar a tensão máxima sobre o resistor de carga (R_s) gerada pela corrente máxima de operação do motor, a Equação (2) deve ser utilizada.

$$V_{ref} = R_s * I_{max} \quad (2)$$

Onde:

V_{ref} tensão de referência [V];

R_s valor resistor de carga [Ω];

I_{max} corrente máxima do motor [A];

Para fazer o ajuste da tensão (V_{ref}) dos *drivers*, foi multiplicado o valor do resistor (R_s) que é de $0,33 \Omega$ pela corrente máxima de cada motor, sendo 2 A para o motor do eixo Y e de 3 A para os eixos X e Z, resultando em um (V_{ref}) de 0,66 V e 0,99 V respectivamente. Os valores de (V_{ref}) são ajustáveis via *trimpot* multivoltas soldado na placa.

Outro cálculo efetuado foi o de frequência de operação do circuito *chopper*, que para o presente trabalho foram baseados nos valores informados no *datasheet* do fabricante, sendo $22 \text{ k}\Omega$ para (R) e $3,3 \text{ nF}$ para (C), resultando em uma frequência de oscilação de 20 kHz. A Equação (3) demonstra esse cálculo.

(3)

$$f_{osc} = \frac{1}{0,69 * R * C}$$

Onde:

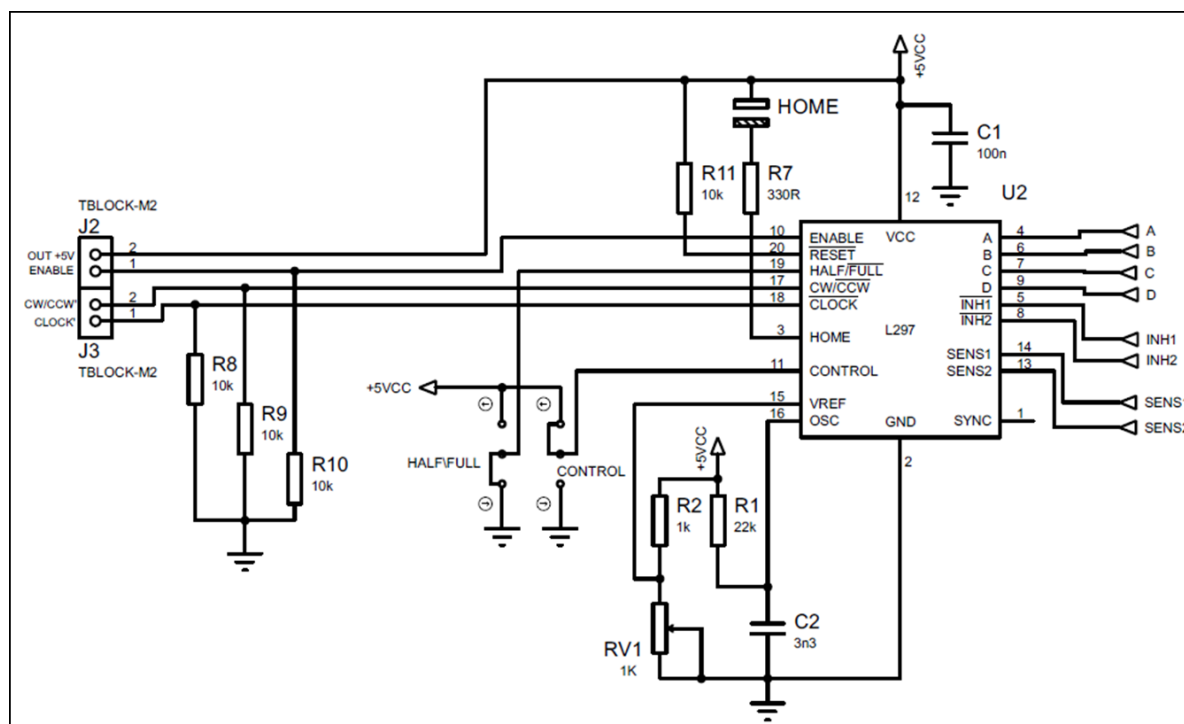
f_{osc} frequência de oscilação [Hz];

R valor resistor de oscilação [Ω];

C valor capacitor de oscilação [F];

A Figura 39 demonstra o circuito de controle dos *drivers*, utilizando CI 297. Nesta parte do circuito, são apresentadas as entradas e saídas apenas da parte de comando. As entradas recebem sinais da placa Arduino UNO, sendo a entrada (*ENABLE*) responsável por habilitar ou desabilitar os motores, (*CW/CCW*) sentido de giro horário ou anti-horário, (*CLOCK*) passos do motor. As saídas (*A*, *B*, *C*, *D*, *INH1* e *INH2*) e entradas (*SENS1* e *SENS2*) foram ligadas ao circuito de potência e serão apresentadas mais adiante.

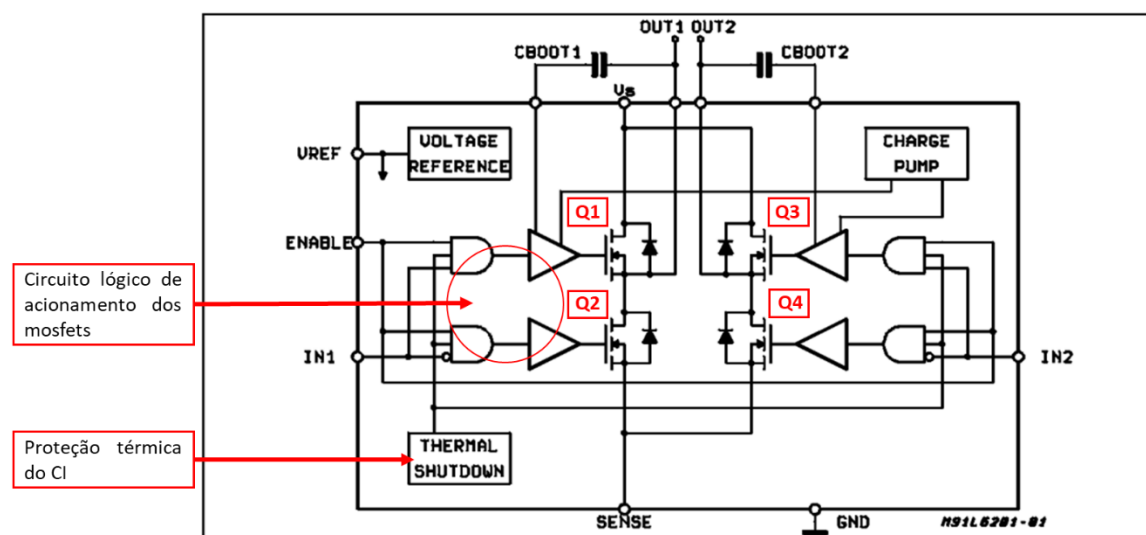
Figura 39 - Circuito de comando *driver* motor de passo.



Fonte: Autor, 2018

A fim de se obter um circuito simplificado, sem os possíveis problemas de acionamento de transistores como vistos na seção 2.4, foram utilizados CIs L6203. Desenvolvido pela *STMicroelectronics*, o L6203 é um *driver* ponte H completa. A escolha desse CI se deu pelas vantagens oferecidas, como a facilidade de acionamento das suas entradas, que podem ser ligadas diretamente as saídas do CI L297, sem a necessidade de resistores *pull-down* ou outros componentes eletrônicos. Possui ainda circuito lógico para barrar o acionamento simultâneo de *mosfets* de mesmo lado da ponte H e proteção térmica de aquecimento do CI. A Figura 40 apresenta o diagrama de bloco do CI.

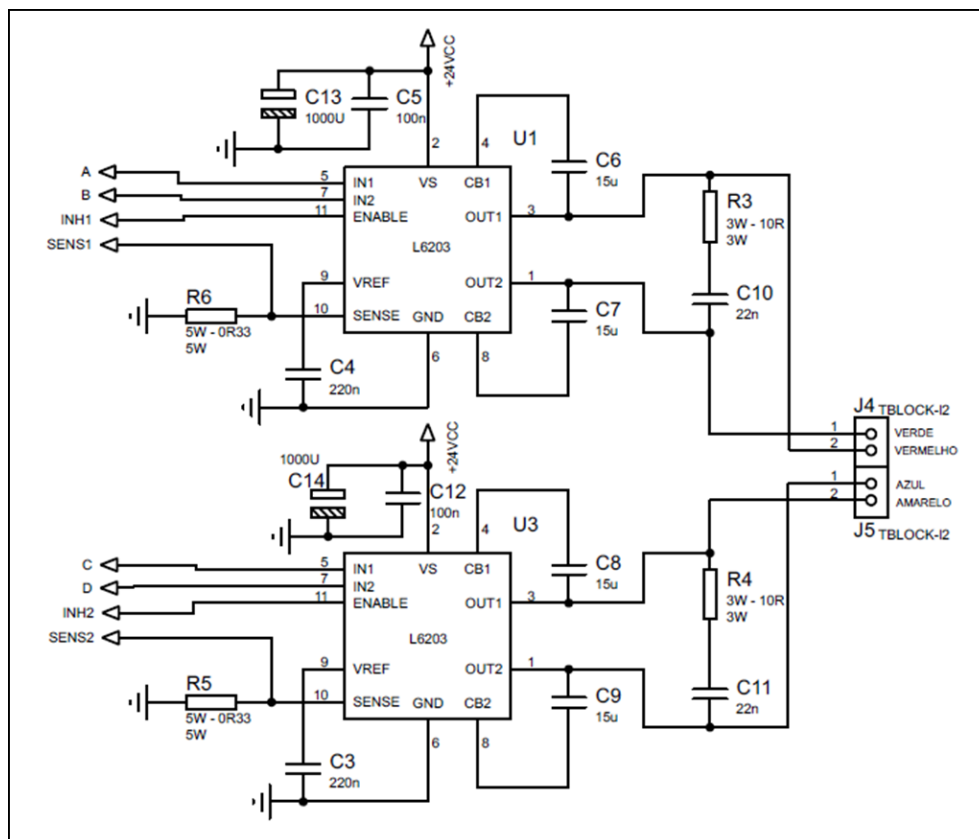
Figura 40 - Diagrama de blocos CI L6203.



Fonte: Adaptado em 27/10/2018 de STMicroelectronics, 1997

Para elucidar, a Figura 41 apresenta o circuito de potência dos *drives* de acionamento dos motores de passo.

Figura 41 - Circuito de potência *driver* motor de passo.



Fonte: Autor, 2018

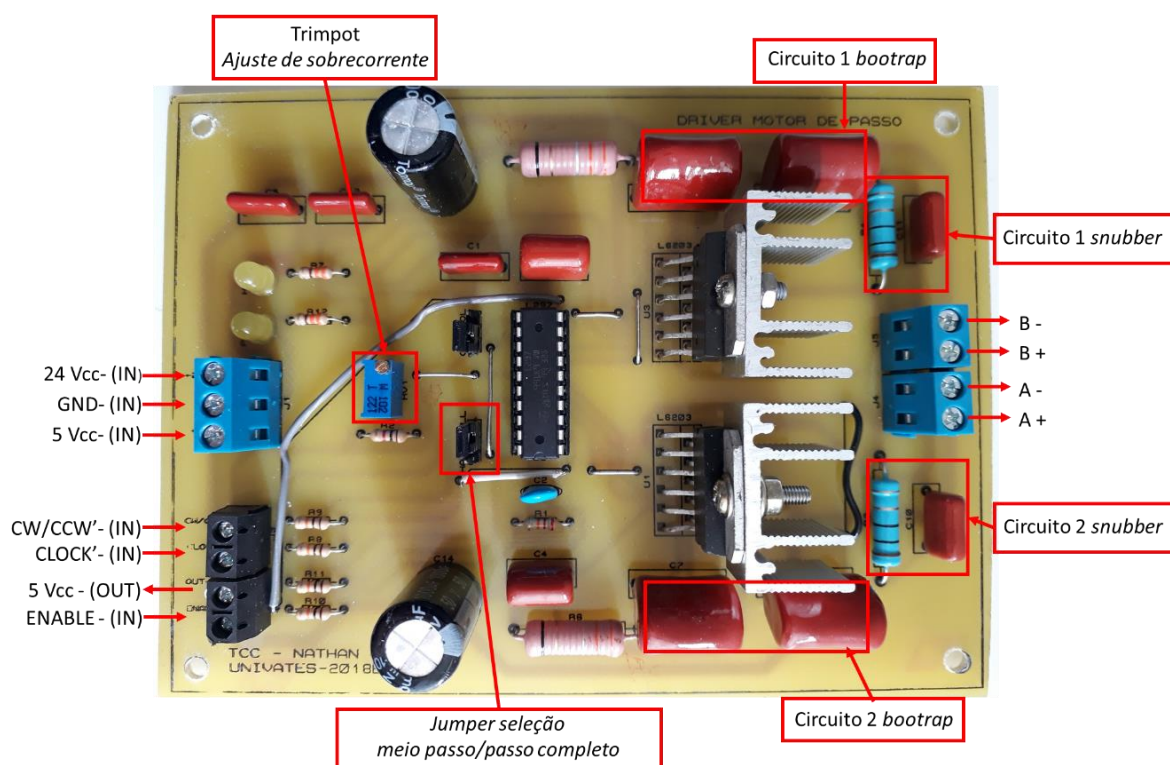
Para a etapa de potência, foram utilizados dois CIs L6203, um para cada bobina do motor, onde (*A*, *B* e *INH1*) são os sinais de entrada fornecidos pelo L297 e (*OUT1* e *OUT2*) são sinais de saída ligados na primeira bobina do motor de passo. Para a segunda bobina (*C*, *D* e *INH2*) são os sinais de entrada fornecidos pelo L297 e (*OUT1* e *OUT2*) são ligados a segunda bobina do motor de passo. Os sinais (*SENS1*) e (*SENS2*) são ligados ao circuito *chopper* do L297, efetuando o monitoramento da corrente sobre as bobinas.

Para implementar os CIs L6203, foram projetados alguns circuitos. Os capacitores (*C6*, *C7*, *C8* e *C9*) são utilizados como circuito de *bootstrap*, circuito esse que simula uma fonte de tensão para acionar os *mosfets* de alta (*Q1* e *Q4*) já que os mesmos não são ligados diretamente à terra e necessitam de 10 V de tensão para seu acionamento.

Outro circuito implementado foi o *snubber*, utilizado nas duas saídas para as bobinas do motor de passo. O circuito consiste em um resistor (R) e um capacitor (C) ligados em paralelo com a carga, sendo ($R3$ e $C10$) na primeira bobina e ($R4$ e $C11$) na segunda bobina. A finalidade do circuito *snubber* é amortecer os picos de tensão causados pelo chaveamento de carga indutiva, que podem danificar ou bloquear a operação dos *mosfets*. Os valores dos circuitos foram encontrados no *datasheet* do fabricante.

A Figura 42 demonstra o *driver* já pronto em PCI, evidenciando as entradas de sinal (CW/CCW , $CLOCK'$, $ENABLE'$), alimentação ($24V_{cc}$, $5V_{cc}$, GND) e circuitos auxiliares (*snubber*, *bootstrap*). São destacados também o *trimpot* de ajuste de (V_{ref}) para sobrecorrente dos motores, permitindo ajustes de corrente de 0 A a 5 A e, por último, o *jumper* de seleção para alterar o modo de operação dos motores de passo entre modo completo e meio passo.

Figura 42 - *Driver* motor de passo em PCI.



Fonte: Autor, 2018

3.4 Software de interface gráfica

Para que o usuário possa comandar e supervisionar as operações da máquina CNC, foi desenvolvido um *software* de interface gráfica em linguagem Java. Para o desenvolvimento da interface foi utilizada a IDE NetBeans 8.2 que é um *software* gratuito multiplataforma. A escolha da linguagem Java se deu pela familiaridade do autor com essa e pela compatibilidade da plataforma com diversos sistemas operacionais, facilitando a instalação da interface gráfica, já que os usuários finais poderão ter diferentes sistemas operacionais.

Inicialmente, ao abrir a aplicação desenvolvida, uma janela de configuração da conexão da máquina será exibida, solicitando a porta de comunicação e a taxa de transmissão em BPS (*Bauds* por segundo) conforme Figura 43 .

Figura 43 - Tela de configuração de conexão da máquina.



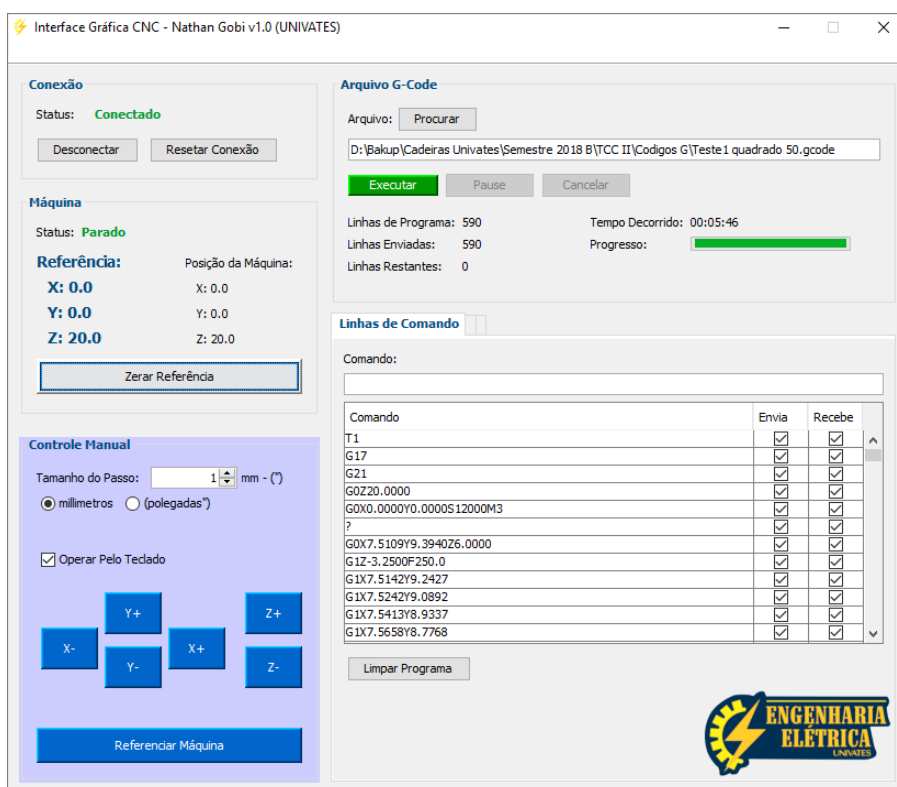
Fonte: Autor, 2018

Após a conexão ser configurada corretamente, a tela principal do programa irá ser aberta, conforme apresentado na Figura 44, permitindo o acesso do usuário às principais funcionalidades da interface, sendo elas:

- Verificar e informar o status da conexão e da máquina;
- Permitir o posicionamento dos eixos da máquina de forma manual;

- Possibilitar o envio da máquina para posição zero a partir de botão específico;
- Carregar e executar programa CNC em formato *g-code*;
- Botões de início/fim e parada do processo;
- Permitir entrada de código CNC manualmente via campo “comando”;
- Visualizar o andamento do programa;

Figura 44 - Tela principal interface gráfica.



Fonte: Autor, 2018

Dentre as funcionalidades da interface gráfica, a principal delas é carregar o arquivo do programa CNC em formato *g-code* e enviá-lo para a placa microcontroladora Arduino. Inicialmente, o programa é carregado na interface pelo botão (*PROCURAR*) onde o usuário localiza o arquivo *g-code* do programa previamente salvo. Após carregar o programa, a interface aguarda confirmação do usuário para a execução, pressionando o botão (*EXECUTAR*).

Quando receber a confirmação de execução, a interface envia uma linha de comando de cada vez para o Arduino e aguarda a confirmação de conclusão da

execução para poder enviar a próxima linha. A quantidade total de linhas do programa CNC e linhas já executadas podem ser monitoradas pela interface, juntamente com o tempo decorrido e barra de progresso. Caso for necessário, é possível pausar ou mesmo cancelar a execução do programa CNC através dos botões (*PAUSAR*) e (*CANCELAR*) respectivamente.

Nas operações do controle manual, a interface define o sistema de coordenadas para incremental *G(91)* e envia um incremento “+” ou decremento “-” de posição a cada clique que o usuário der nos botões de posição *X+/X-*, *Y+/Y-* e *Z+/Z-*, multiplicando a quantidade de cliques pelo valor selecionado na caixa de texto (*TAMANHO DO PASSO*).

Para referenciar a máquina, o usuário deve pressionar a tecla (*REFERENCIAR MÁQUINA*), assim o programa irá usar os valores atuais no campo (*REFERÊNCIA*) para gerar uma linha de código a ser enviada para o Arduino com as coordenadas que levarão a máquina para a posição zero.

3.4.1 Algoritmo da placa microcontroladora

O algoritmo implementado na placa microcontroladora Arduino Uno foi desenvolvido com IDE Arduino 1.8.2 em linguagem C++. Sua função é de leitura, interpretação e execução das linhas de programa recebidas pela interface gráfica em formato de *g-code*.

Inicialmente, após ser estabelecida a comunicação entre interface gráfica e placa microcontroladora, o algoritmo executa uma rotina para identificar o recebimento de linhas de código ou comandos CNC enviados pela interface. Quando identificado o recebimento, o algoritmo de controle executa o tratamento das informações.

Quando forem comandos modais preparatórios, como por exemplo *G(90)* coordenada absoluta ou *G(91)* coordenada incremental, o algoritmo seta as variáveis

e ajusta as operações e cálculos de acordo com a variável, para posteriormente processar e executar de forma correta os comandos de movimentação dos eixos.

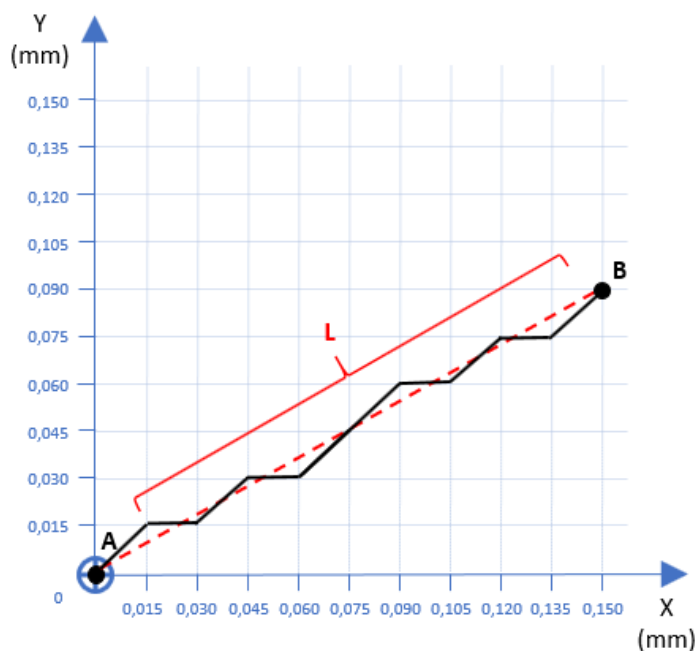
Já no caso de comandos de miscelâneas, variáveis booleanas, como por exemplo *M(03)* liga motor ferramenta ou *M(05)* desliga motor ferramenta, o algoritmo seta as variáveis para ligarem ou desligarem.

Para comandos do tipo *G(00)* posicionamento rápido e *G(01)* interpolação linear são executadas rotinas de cálculo para movimentação dos eixos, onde são determinados os números de passos necessários para deslocamento da trajetória desejada e a frequência com que esses passos devem ser executados, definido pela velocidade de deslocamento carregada através do comando (*F*) *feed rate*, sendo a máxima velocidade da máquina configurada em 300 mm/min a partir de testes efetuados.

Quando o comando *G(01)* interpolação linear é utilizado no programa, em determinados movimentos os eixos X e Y devem atuar simultaneamente afim de se percorrer uma trajetória linear. Mas, para que a trajetória seja traçada da forma correta, ambos os eixos devem iniciar e finalizar o movimento juntos e, em determinadas trajetórias, a distância a ser percorrida pelos eixos X e Y são distintas, implicando na execução de maior número de passos para um dos eixos e, consequentemente, maior velocidade de deslocamento.

A Figura 45 demonstra um exemplo de trajetória de utilização da interpolação linear onde o deslocamento e velocidade do eixo X será maior do que em Y.

Figura 45 - Trajetória interpolação linear.



Fonte: Autor, 2018

Na Figura 45, a trajetória desejada é a descrita pela linha tracejada vermelha (L), e a trajetória executada pela máquina é a linha contínua preta saindo de (A) até (B).

Para executar a interpolação linear é preciso calcular a distância a ser percorrida por cada um dos eixos. Se o sistema de coordenadas utilizado for o absoluto $G(90)$, utilizam-se as Equações (4) e (5), mas se for o sistema incremental $G(91)$, o próprio sistema informa o valor do deslocamento e o sentido, como visto na seção 2.1.2 Programação CNC.

$$\Delta_X = X_{final} - X_{inicial} \quad (4)$$

$$\Delta_Y = Y_{final} - Y_{inicial} \quad (5)$$

O próximo passo é calcular a distância total da trajetória (L), que pode ser encontrada pelo Teorema de Pitágoras, conforme Equação (6).

(6)

$$L = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2}$$

Após calcular a distância da trajetória em mm e sabendo a velocidade de avanço (F) carregado no programa CNC em mm/min, pode ser calculado o tempo total para execução da trajetória que deve ser convertido para mm/s, pois o segundo foi a unidade utilizada nos temporizadores da placa microcontroladora. A Equação (7) apresenta o cálculo de tempo da trajetória.

(7)

$$t = \frac{60 * L}{F}$$

Onde:

t é o tempo total da trajetória em [s];

L é o comprimento da trajetória a ser percorrida em [mm];

F é a velocidade em [mm/min];

Encontrando o tempo total da trajetória e resolução do eixo, é possível calcular a velocidade que cada motor deve operar. Para os eixos X e Y a resolução é de 0,015 mm e para o eixo Z é de 0,01 mm. A Equação (8) apresenta o cálculo de velocidade dos motores em passos/s que deve ser calculada para cada eixo movimentado.

(8)

$$V_X = \frac{\Delta_X}{R * t}$$

Onde:

V_X é a velocidade do motor em [passos/s];

Δ_X é o deslocamento do eixo em [mm];

R é a resolução do eixo em [mm];

t é o tempo total da trajetória em [s];

Já para comandos do tipo $G(00)$ de posicionamento rápido, os eixos não movimentam-se simultaneamente, ou seja, um eixo só opera se o outro já finalizou sua trajetória, sendo utilizadas sequencialmente as equações (9) e (8), onde a velocidade de deslocamento é sempre definida como a máxima da máquina, ou seja, 300 mm/min.

$$t = \frac{60 * \Delta_x}{F} \quad (9)$$

Onde:

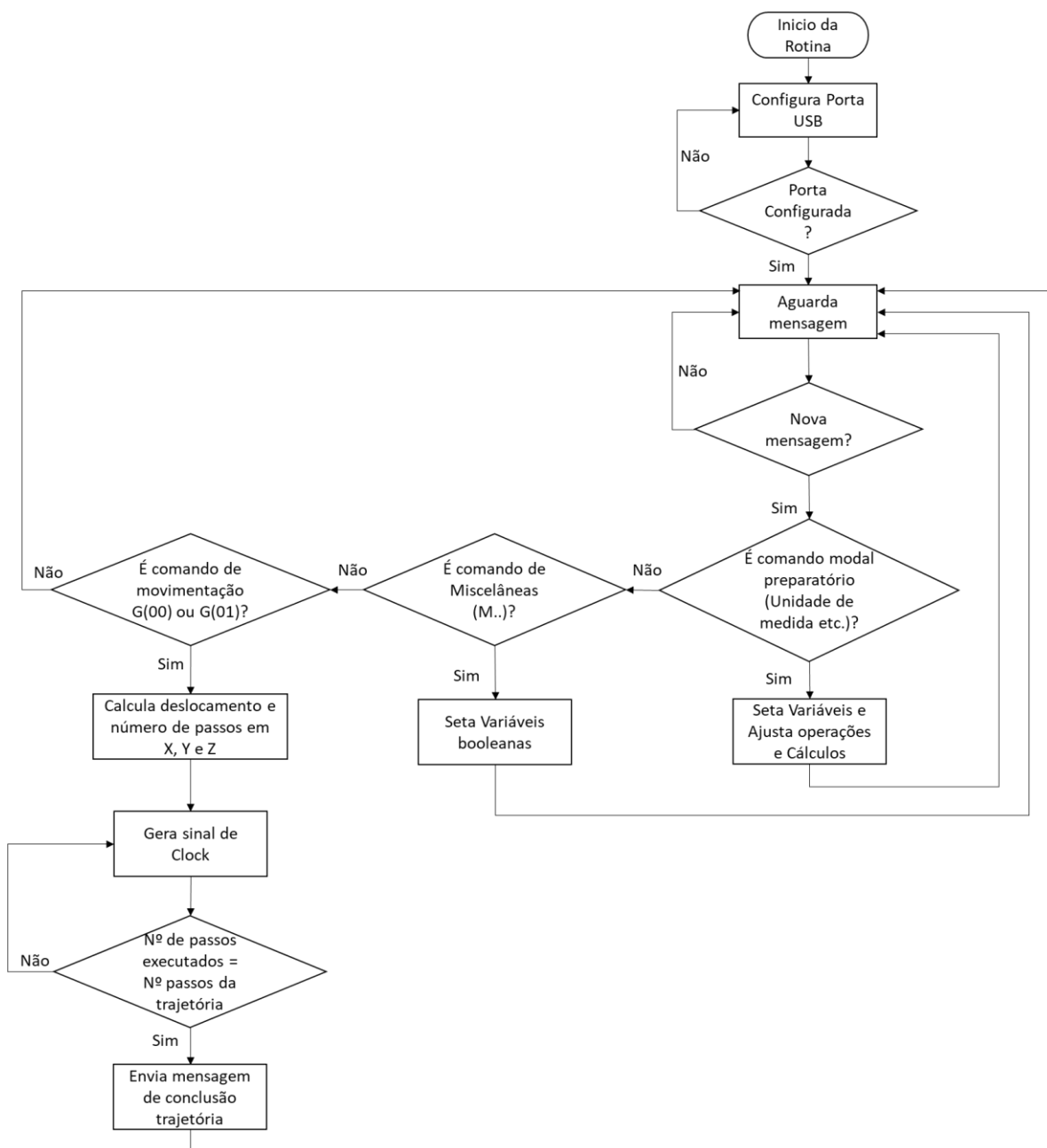
t é o tempo total da trajetória em [s];

Δ_x é o deslocamento do eixo em [mm];

F é a velocidade em [mm/min];

Para elucidar, a Figura 46 apresenta um fluxograma com as rotinas que o algoritmo implementado no Arduino executa.

Figura 46 - Fluxograma do algoritmo implementado na placa microcontroladora.



Fonte: Autor, 2018

3.5 Custo do projeto

Afim de se obter um comparativo entre os custos do projeto e valor das máquinas CNCs disponíveis no mercado, foi elaborada a Tabela 6, evidenciando os custos das várias partes da máquina e o investimento total.

Como pode ser visto na Tabela 6, a maior parte do custo é relativa a estrutura mecânica onerada pelos fusos trapezoidais, guias lineares e rolamentos, que são as peças com custo mais elevado, seguidas dos motores de passo que, juntos, representam aproximadamente 73% do custo total da máquina.

Para a parte eletrônica, os custos representam um percentual menor, onde o desenvolvimento de todo *hardware* eletrônico e utilização do Arduino possibilitaram redução de custos nesta etapa da máquina.

É importante salientar que os valores da Tabela 6 não levam em consideração o custo da mão de obra para programação, desenvolvimento e montagem do sistema proposto.

Tabela 6 - Custo do projeto.

Item	Preço
Estrutura mecânica	R\$ 1.273
Motores de Passo	R\$ 414
Motor Ferramenta	R\$ 170
Kit de 12 Fresas	R\$ 50
Arduino Uno	R\$ 38
<i>Drivers</i> Motor de Passo (3un.)	R\$ 191
Quadro eletrônico e Cabeamento	R\$ 165
TOTAL	R\$ 2301

Fonte: Autor, 2018

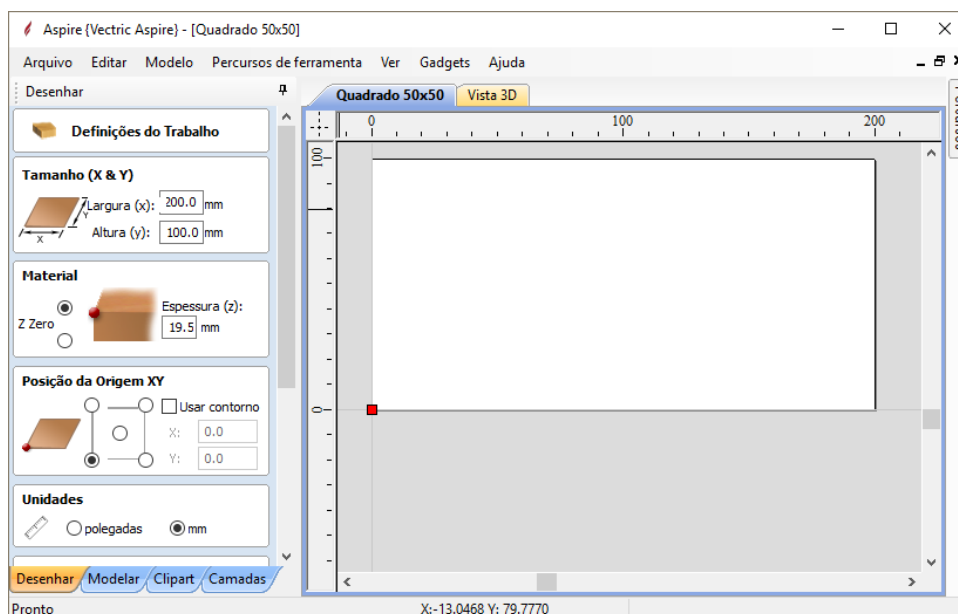
4 RESULTADOS

Com o intuito de comprovar o funcionamento do protótipo desenvolvido, foram realizados testes de corte e gravação em chapas de MDF. Para o primeiro teste foram cortadas quatro peças iguais para verificar a repetibilidade da máquina. E o segundo teste, foi a gravação de duas figuras conforme apresentado a seguir.

4.1 Teste prático de corte

No primeiro teste prático, foram cortados quatro quadrados de 50 mm x 50 mm em chapa de MDF de 19,5mm de espessura, para testar a repetibilidade da máquina. O desenho da peça e código do programa CNC foram desenvolvidos no *software* Aspire 8.0. Na Figura 47 é apresentada a tela do programa para configuração do material utilizado no corte, que para o teste foi configurado com as dimensões da chapa, sendo (X) 200 mm e (Y) 100 mm com espessura de (Z) 19,5 mm e unidade de medida em (mm).

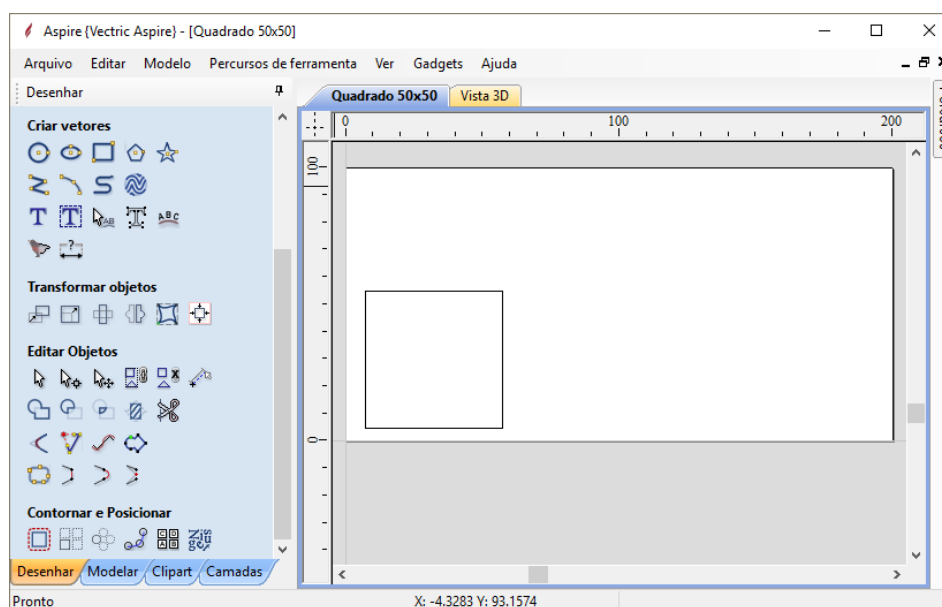
Figura 47 - Configuração do material.



Fonte: Autor, 2018

Após finalizar a configuração do material, o próximo passo foi desenhar a peça. A Figura 48 mostra o desenho do quadrado de 50 mm x 50 mm sobre a chapa de corte.

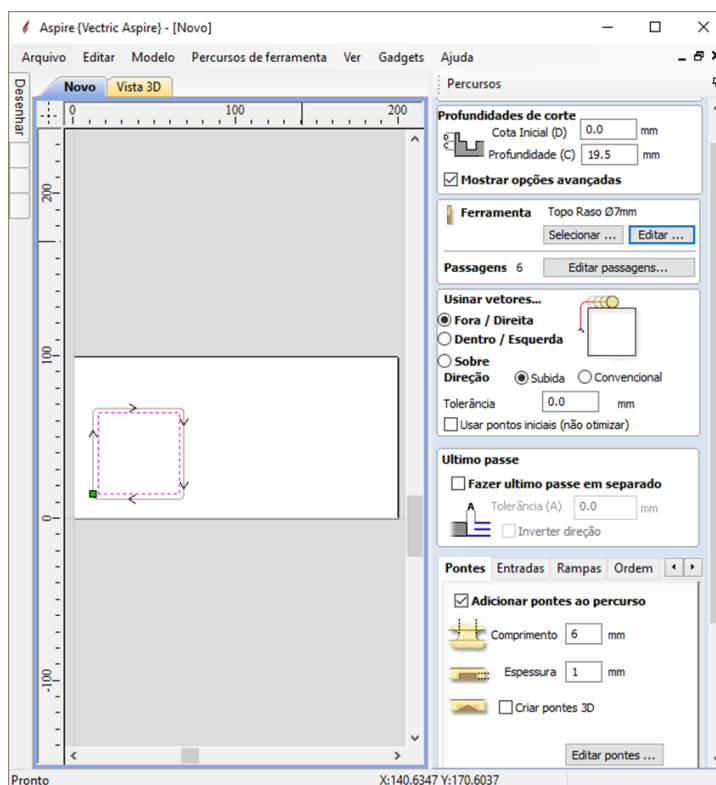
Figura 48 - Desenho da peça para corte.



Fonte: Autor, 2018

Com o desenho pronto, a próxima etapa foi configurar o tipo da ferramenta de corte especificando o diâmetro e formato da mesma. Também foram configurados a profundidade de corte, quantidade de passagens, velocidade de avanço e percurso da ferramenta. A Figura 49 demonstra a tela de configuração.

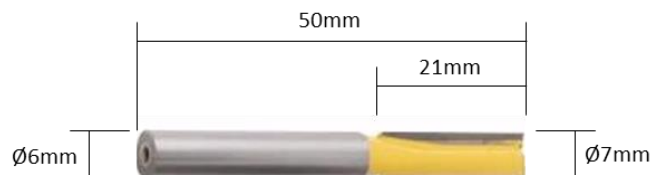
Figura 49 - Configuração de corte.



Fonte: Autor, 2018

No parâmetro profundidade o valor utilizado foi de 19,5 mm, valor esse que corresponde a espessura da chapa. Para o número de passagens necessárias para o corte da peça, foi definido o valor de seis passagens, que resulta num avanço da ferramenta no eixo Z de pouco mais de 3 mm por passagem, valor esse encontrado a partir de testes. O percurso da ferramenta foi definido como externo, opção esta que faz com que a ferramenta percorra as linhas do desenho pela parte externa do mesmo, com velocidade de avanço ajustada em 250 mm/min e ferramenta configurada conforme dimensões da Figura 50.

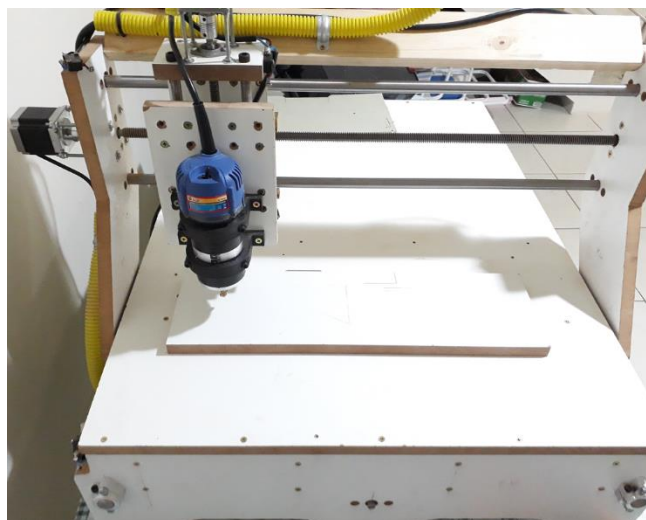
Figura 50 - Fresa Ø 7 mm.



Fonte: Autor, 2018

Ao finalizar as configurações, o arquivo *g-code* foi gerado e finalmente o programa pôde ser carregado pela interface gráfica para execução do corte. A Figura 51 é uma fotografia da chapa já fixada e pronta para o corte.

Figura 51 - Chapa MDF fixada para o corte.

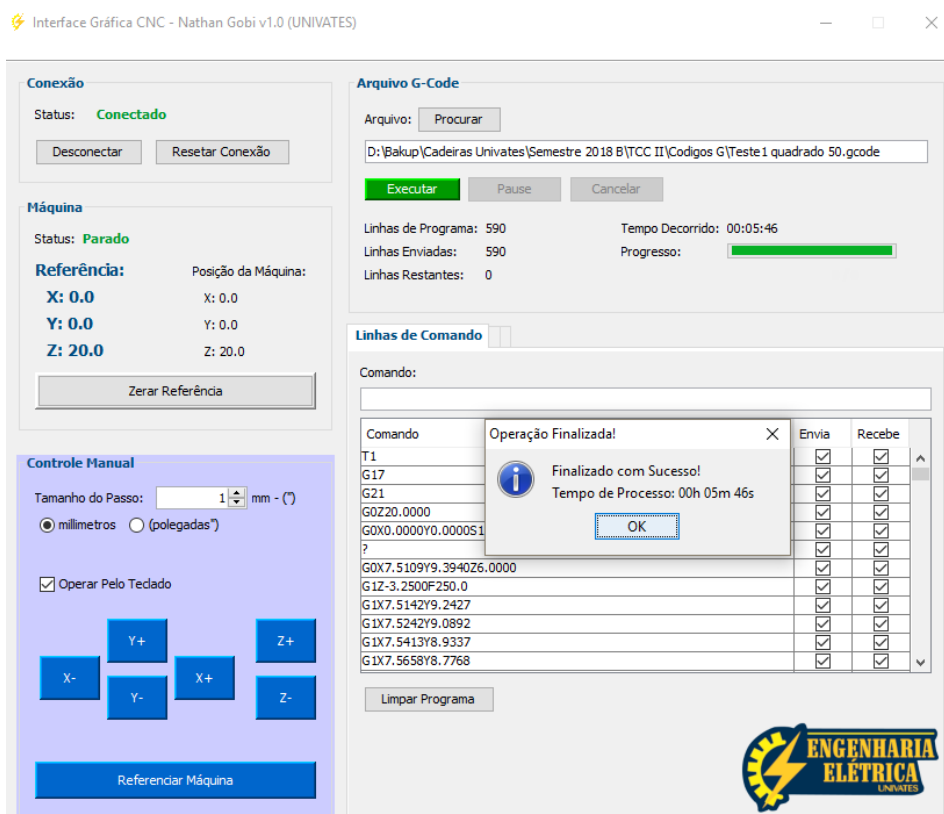


Fonte: Autor, 2018

Antes de iniciar o corte, foi preciso referenciar a máquina afim de informar qual é a posição inicial na chapa, procedimento este feito movimentando os eixos no modo manual, aproximando a ferramenta ao ponto de início. Após referenciar a ferramenta é preciso zerar a referência para que a máquina entenda que está é a posição inicial zero da máquina.

Com a máquina referenciada, o próximo passo foi carregar o programa e executá-lo. A Figura 52 mostra a tela da interface gráfica com o arquivo *g-code* carregado e execução do corte já finalizada. Ao todo a execução levou 5 min 46 s para ser concluída.

Figura 52 - Tela interface gráfica processo de corte finalizado.



Fonte: Autor, 2018

Com o corte da primeira peça finalizado, foram tiradas as medidas dimensionais da mesma, afim de aferir qual foi o resultado. Conforme demonstra a Figura 53 a medida ficou em 48,70 mm, bem abaixo do esperado. Isso ocorreu pois a fresa de corte não era de $\varnothing 6$ mm conforme especificação do fabricante, mas sim de $\varnothing 7$ mm, então foram ajustados os parâmetros do programa CNC e refeitos os testes em mais três peças que resultaram nos valores conforme Figura 54.

Figura 53 - Teste de corte peça 1.



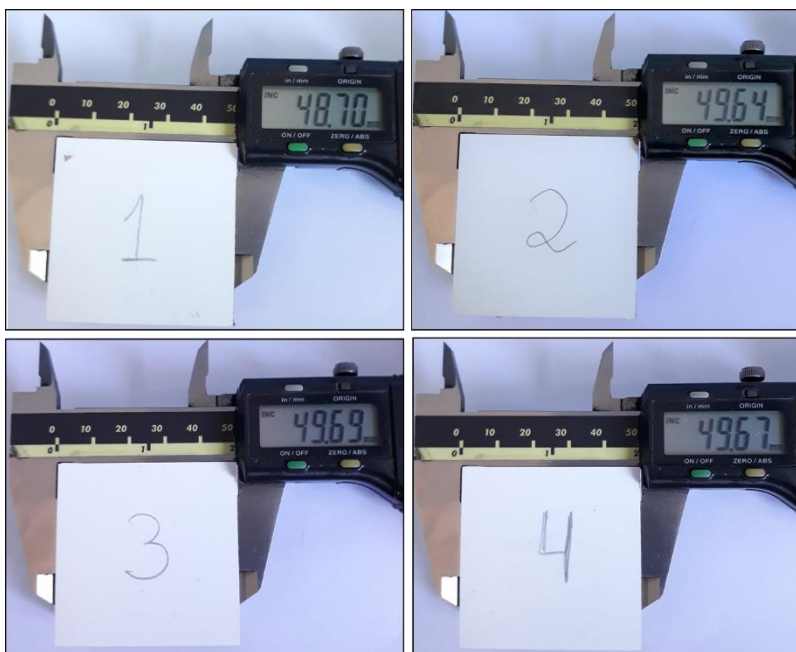
Fonte: Autor, 2018

Apesar do problema ocorrido no corte da primeira peça, as demais tiveram resultados muito próximos ficando com uma diferença de 0,05 mm entre a maior e menor medida. Outro ponto a ser destacado, é a diferença entre a medida desejada de 50 mm e a resultante, que chega ser de 0,36 mm na peça de número 2. Os prováveis motivos desse erro são:

- Os parâmetros de deslocamento da ferramenta configurados no programa Aspire, parâmetros esses que podem ser ajustados para afastar ou aproximar a ferramenta das linhas da peça.
- A resolução teórica calculada pela Equação (1) ser diferente da real, ou seja, o número de passos enviado para cada milímetro deslocado é menor do que o necessário.

No geral, a máquina apresentou um bom resultado no quesito precisão, sendo necessário apenas ajustes para que a sua exatidão seja melhorada.

Figura 54 - Teste de corte peças 1, 2, 3 e 4.



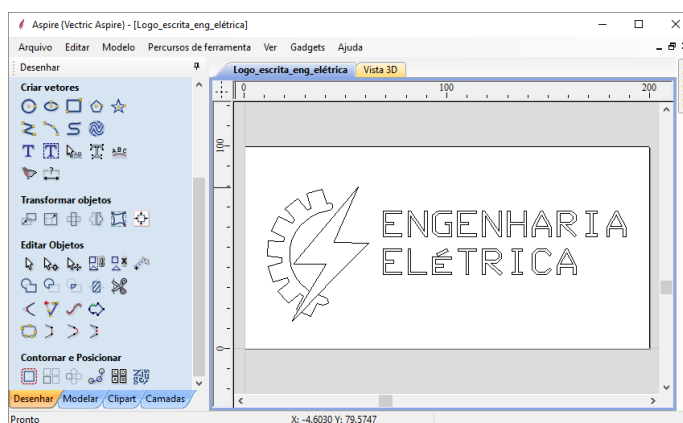
Fonte: Autor, 2018

4.2 Teste prático de gravação

Para o segundo teste prático, foram gravadas duas figuras em chapa de MDF. A configuração do material para a primeira gravação (Engenharia elétrica) foi igual à do teste de corte conforme Figura 47. Já para a gravação (Logo Univates) as dimensões da chapa foram de (X) 60 mm e (Y) 60 mm com espessura de (Z) 19,5 mm.

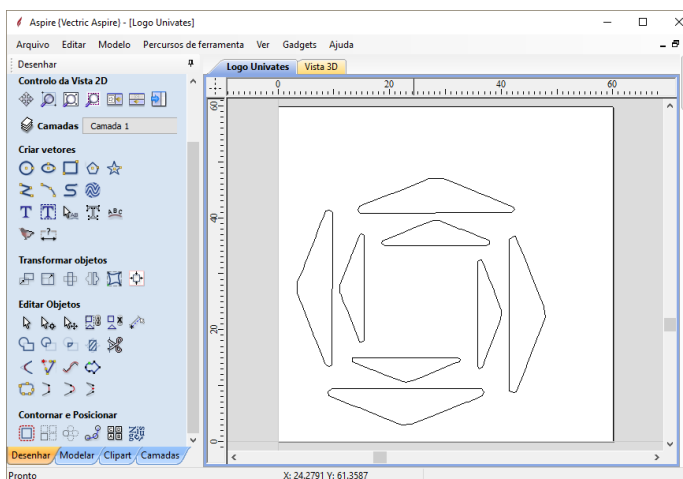
Após finalizar a configuração do material, o próximo passo foi desenhar as figuras a serem gravadas. As Figura 55 e Figura 56 apresentam as gravuras da (Engenharia Elétrica) e (Logo da Univates) respectivamente sobre as chapas de corte.

Figura 55 - Gravura engenharia elétrica.



Fonte: Autor, 2018

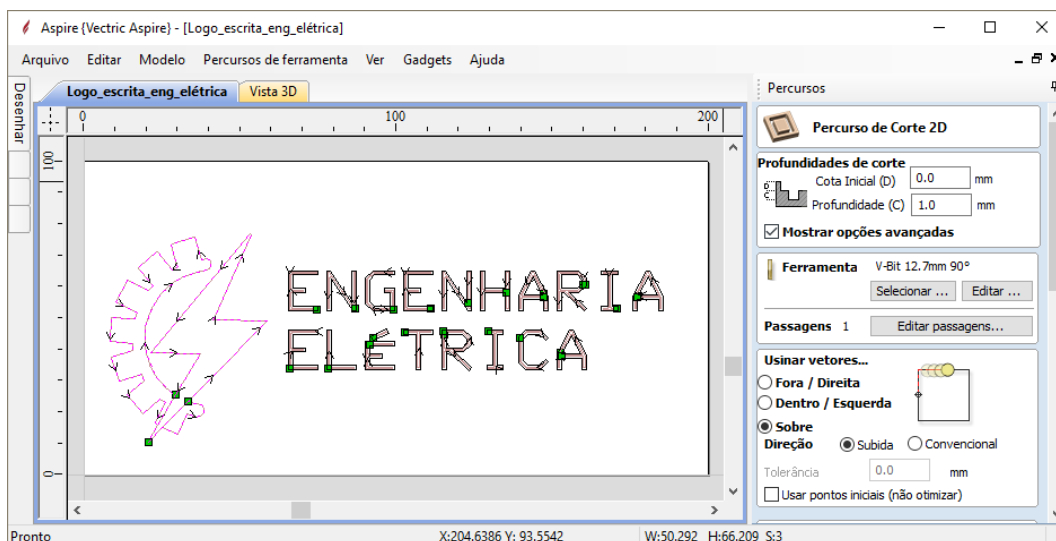
Figura 56 - Gravura Univates.



Fonte: Autor, 2018

Semelhante ao teste de corte, a próxima etapa foi de configuração dos parâmetros para gravação. A Figura 57 demonstra a tela de configuração.

Figura 57 - Configuração de gravação.



Fonte: Autor, 2018

Os parâmetros utilizados foram os mesmos para as duas gravações (Engenharia Elétrica) e (Logo Univates). Na profundidade o valor utilizado foi de 1 mm possibilitando a execução das gravuras em apenas uma passagem. Para o percurso da ferramenta foi selecionada a opção sobre, função essa que faz com que a ferramenta execute seu percurso sobre as linhas da figura, com velocidade de avanço ajustada em 250 mm/min e para a ferramenta as dimensões foram ajustadas conforme Figura 58.

Figura 58 - Fresa V Ø 12,7 mm.

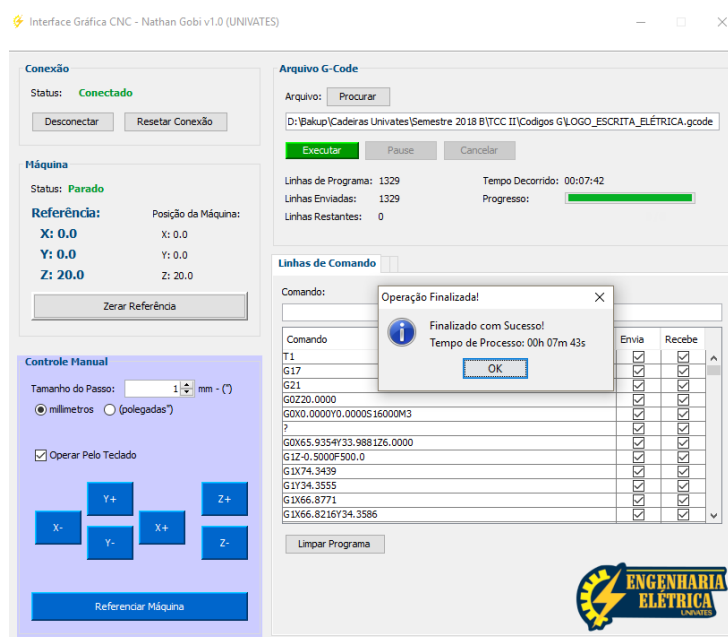


Fonte: Autor, 2018

Ao finalizar as configurações, foram gerados os dois arquivos *g-code* e efetuado a referência da máquina.

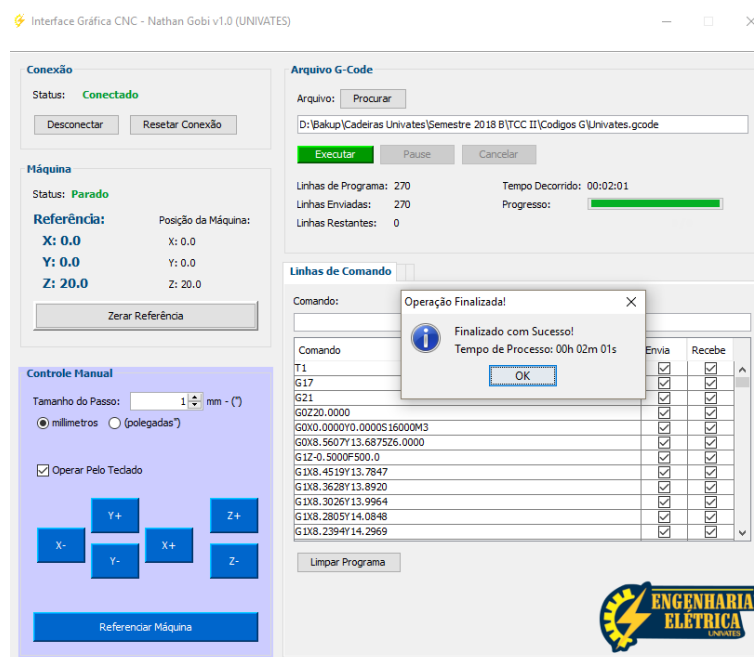
Com a máquina referenciada, o próximo passo foi carregar o programa e executá-lo. As Figura 59 e Figura 60 mostram as telas da interface gráfica com os arquivos *g-code* das figuras (Engenharia Elétrica) e (Logo Univates) carregados e com a execução da gravação já finalizada. Ao todo a execução levou 7 min 43 s para (Engenharia Elétrica) e 2 min 1 s para (Logo Univates).

Figura 59 - Tela interface gráfica processo de gravação engenharia elétrica finalizado.



Fonte: Autor, 2018

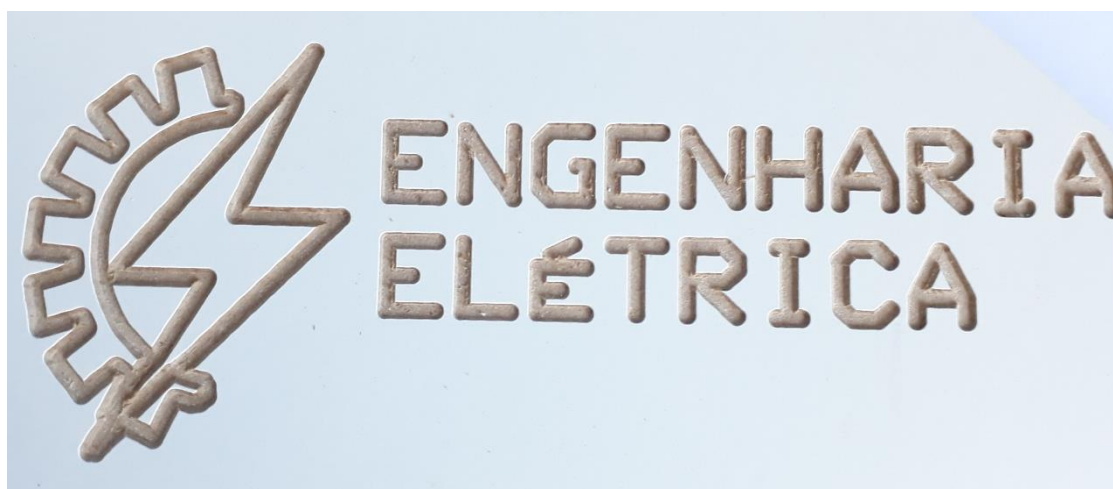
Figura 60 - Tela interface gráfica processo de gravação logo Univates finalizado.



Fonte: Autor, 2018

Finalizadas as gravações, as Figura 61 e Figura 62 apresentam os resultados. Na gravura (Engenharia Elétrica) a parte escrita ficou muito boa, com as bordas bem definidas, mas no logo da (Engenharia Elétrica) o canto inferior ficou mal-acabado pois as linhas de gravação eram muito próximas e a ferramenta muito grande para essa operação.

Figura 61 - Teste de gravação engenharia elétrica.



Fonte: Autor, 2018

Já para a gravura (Logo Univates) o acabamento ficou muito bom com bordas bem-acabadas e retilíneas conforme Figura 62.

Figura 62 - Teste de gravação logo Univates.



Fonte: Autor, 2018

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo de máquina CNC de pequeno porte e baixo custo para utilização nos processos de corte e gravação em micro e pequenas empresas, a partir da utilização de conhecimentos adquiridos na graduação em diferentes áreas, como mecânica, eletrônica e programação computacional.

Apesar da estrutura ser em MDF, os testes de corte demonstraram que houveram poucas variações dimensionais entre as peças e uma boa repetibilidade, com variações na faixa de 0,05 mm, sendo um bom resultado para uma estrutura em MDF.

Com uma interface gráfica de operação simples e direta, a operação da máquina se mostrou fácil e intuitiva, favorecendo o rápido aprendizado do usuário.

Por meio de testes práticos realizados, obteve-se resultados que comprovaram que a máquina executa operações de forma compatível com sistemas similares, podendo ser utilizada para operações de corte e gravação em micro e pequenas empresas, atendendo ao critério de baixo custo em comparação a outras máquinas semelhantes disponíveis no mercado. Dessa forma, conclui-se que objetivo proposto pelo trabalho foi atingindo.

Como sugestões para trabalhos futuros, algumas melhorias que podem ser implementadas são:

- Implementar um campo para visualizar o percurso do programa carregado na interface gráfica, prevendo possíveis erros.
- Melhorar o programa implementado no Arduino, aumentando a gama de comandos CNC suportados. Exemplo a adição dos comandos de interpolação circular G02 e G03.
- Substituir os fusos de rosca trapezoidal por fusos de esferas recirculantes, o que proporcionará menos atrito na movimentação dos eixos e maior durabilidade das peças mecânicas.
- Adição de *encoders* aos motores de passo, ou substituí-los por servo motores, criando um controle de malha fechada que possibilita autocorreções de posicionamento em caso de desgastes do conjunto de tração ou por eventuais travamentos do eixo ao longo da operação.
- Troca da estrutura de MDF por metal, e tupa para motor *spindle*, possibilitando a usinagem de peças metálicas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. Arduino IDE 1.8.5: **IDE de programação para Arduino**. 2018. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 14 abr 2018.

ARDUINO. **Arduino UNO**. 2018. Disponível em: < <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 14 abr 2018.

ARTSOFT. Mach 3: **Interface Gráfica controle CNC**. 2018. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/software/mach3/>>. Acesso em: 27 out 2018.

ATMEL. **ATmega328P Datasheet**. 2018. Disponível em: < http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf >. Acesso em: 14 abr 2018.

AUTODESK. Inventor: **Software CAD 3D para o desenvolvimento de produtos**. 2018. Disponível em:<<https://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>>. Acesso em: 07 abr 2018.

BATISTA, Claudia R. **A modelagem 3d digital de joias e o processo de prototipagem rápida** In: XXI Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico, 21., International Conference on Graphics for Arts and Design,10., 2013, Florianópolis, SC. **A modelagem 3d digital de joias e o processo de prototipagem rápida**. Florianópolis, SC: 2013. p. 1-2, 5, 6 e 8.

BRITES, Felipe G.; SANTOS, Vinicius P. de A. **Motor de Passo**. Niterói, 2008. Disponível em: <<http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>>. Acesso em: 10 mar 2018.

CONSTANDINOU, Timothy G. Stepper Motors Uncovered (1). **Magazine Elektor Electronics**, Susteren, v.11, n.1, p. 36-40, 2003. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/43bf/3c37cc19958a5b32e9aa011fab6b2881d7da.pdf>>. Acesso em: 10 mar 2018.

COMPUSOFTWARE-BR. **CNC-Router Hobby-755**. 2018. Disponível em: <http://www.compusoftware-br.com.br/cnc_router_hobby_755/prod-6286050/>. Acesso em: 27 out 2018.

COSTA, Éder S. **Processos de Usinagem**. 2006. p. 63 – 82. Apostila, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, 2006. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABpNMAB/usinagem#>>. Acesso em: 24 mar 2018.

DISTRITEC. **Router CNC RC0807**. 2018. Disponível em: <<http://www.distriteccnc.com.br/produto-page.php?id=6&menu=9?menu=10&uri=router-cnc-rc0807-area-util-800-x-700-x-60mm>>. Acesso em: 27 out 2018.

ELETRU'S COMPONENTES ELETRÔNICOS. **Motor de Passo: Bipolar**, 200 pulsos/rotação, NEMA 17 4,5kgf.cm, 8V, 1.68A/fase. 2018. Disponível em: <<https://www.eletruscomp.com.br/produto/motor-de-passo-nema-17-4-5kgf-cm-jk42hs48-1684/>>. Acesso em: 10 mar 2018.

EXTRA. **Tupia laminadora manual**: Pinça 6mm - 1/4", 650 Watts, 32000RPM. 2018. Disponível em: < <https://www.extra.com.br/Ferramentas/FerramentasEletricas/DiversosFerramentas/tupia-manual-laminadora-pinca-6mm-650-watts-madeira-mfd-acm-12514429.html> >. Acesso em: 14 abr 2018.

FEUSER, M. F. et al. **Análise das Decisões de Investimentos em uma empresa no Oeste do Paraná** In: Conferência Internacional em Gestão de Negócios, 1., 2015, Cascavel, PR. **Análise das Decisões de Investimentos em uma empresa no Oeste do Paraná**. Cascavel, PR: CINGEN, 2015. p 7 - 8, 11 e 12.

FONSECA, Joaquim da H. O; XAVIER, Leydervan de S; PEIXOTO, José A. **As possíveis contribuições da prototipagem rápida para a melhoria da competitividade na produção joalheira da cidade do Rio de Janeiro**. Anais do ENEGEP 2006 – XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2006.

GOELLNER, Erika. **Ferramenta Computacional para Acionamento de Motores de Passo Aplicados ao Projeto de Equipamentos CNC**. 2006. 130p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8029/2006%20GOELLNER,%20Erika%20Pag%2001%20-%20100.pdf>>. Acesso em: 10 mar 2018.

HILLIS, S. **History of CNC Machining: How the CNC Concept Was Born**. 2017. Disponível em: < <https://www.cmsna.com/blog/history-of-cnc-machining-how-the-cnc-concept-was-born/>>. Acesso em: 24 mar 2018.

JDR PROJETOS E COMPONENTES. **CNC Router - A6550**. 2018. Disponível em: <<https://www.jdrprojetos.com.br/cnc-router-a6550-estrutura-em-aluminio-completa-tupia-makita>>. Acesso em: 27 out 2018.

LABCENTER. **Proteus Professional Demonstration 8.6: Software simulador de circuitos eletrônicos e placas de circuito impresso**. 2018. Disponível em:<<https://www.labcenter.com/downloads/>>. Acesso em: 21 abr 2018.

LUDWIG, J. et al. **Processos de usinagem de madeira: comparação entre processos** In: Encontro Fluminense de Engenharia de Produção (ENFEPro), 4., 2013, Nova Iguaçu, RJ. **Processos de usinagem de madeira: comparação entre processos**. Volta Redonda, RJ: ENFEPro, 2013. p 2, 3, 8 e 9.

MAIMON, Felipe. **Projeto de um sistema eletrônico para controle de motores de alta potência por PWM**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04_Felipe_Maimon.pdf>. Acesso em: 21 abr 2018.

MULTILÓGICA. **Arduino Guia Iniciante**. v1.0, 150p. Disponível em: < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3252633/mod_resource/content/1/Guia_Arduino_Iniciante_Multilogica_Shop.pdf>. Acesso em: 21 abr 2018.

NAVARRO, H. A. **Desenvolvimento de um sistema para programação comando numérico para peças rotacionais**, Dissertação de Mestrado – EESC - USP, São Carlos, SP, 1991.

NETBEANS. **Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) 8.2**. 2018. Disponível em: <<https://netbeans.org/features/index.html>>. Acesso em: 21 abr 2018

NETTO, Luiz F. **Motores Elétricos**. 2005. Disponível em:<<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1875>>. Acesso em: 31 mar 2018

PEREIRA, Athos G. **Desenvolvimento e Avaliação de um Editor para Programação CN em Centros de Usinagem**. 2003. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_013.pdf>. Acesso em: 24 mar 2018.

PROFELECTRO, **Robótica – Apontamentos (parte 10) / Ficha de Trabalho 10, com questionário (actuadores: servomotores e motores passo-a-passo)**. Disponível em: <<http://www.profelectro.info/robotica-apontamentos-parte-10-ficha-de-trabalho-10-com-questionario-actuadores-servomotores-e-motores-passo-a-passo/>>. Acesso em: 10 mar 2018.

PROFUTURO, **Plano de CT&I para Manufatura Avançada no Brasil**. Cartilha Plano do CTI, Brasília, DF, 2017. Disponível em: < http://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologias_convergentes/arquivos/Cartilha-Plano-de-CTI_WEB.pdf>. Acesso em: 07 abr 2018.

RENNA, R et al. **Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino**. Niterói, 2013. Disponível em:< http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/arduino/Tut_Arduino.pdf>. Acesso em: 12 mai 2018.

SEAMES, Warren S. **Computer Numerical Control – Concepts & Programming**. 4 ed. New York: Ed. Delmar – Thomson Learning, 2002. p. 1 – 4.

SMID, Peter. **CNC Programing Handbook**. 3a ed. New York: Industrial Press Inc., 2008.

SOUZA, Marco A. A. **Implementação de Sistema Controlado de Motor de Passo em Malha Fechada Utilizando Tecnologia Baseada em Controle Digital de Sinais**. São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/18042100/tce-14052010-111439/>>. Acesso em: 10 mar 2018.

STMICROELECTRONICS. **AN470 Application Note the L297 Stepper Motor Controllers**. 2003. Disponível em: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/0a/84/39/6c/ae/9a/42/0a/CD00003803.pdf/files/CD00003803.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003803.pdf>. Acesso em: 14 abr 2018.

STMICROELECTRONICS. **L297 Stepper Motor Controllers**. 2001. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000063.pdf>>. Acesso em: 14 abr 2018.

STMICROELECTRONICS. **L6203 Full Bridge Driver**. 1997. Disponível em: <<http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L6203.pdf>>. Acesso em: 31 out 2018.

VASQUES, Heber D. S; ROSTIROLLA, Rodrigo. **Motor de Passo e Motor Brushless**. São Leopoldo, 2015. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhLDsAF/motor-passo-motor-brushless-curso-tecnico-eletrotecnica>>. Acesso em: 10 mar 2018

VETRIC. Aspire 8.0: **Software de modelagem para usinagens 2D e 3D**. 2018. Disponível em: <<https://www.vetric.com/products/aspire.html>>. Acesso em: 03 nov 2018.

VIVALDINI, Kelen C. T. **Motores De Passo: Material Complementar**. São Carlos, 2009. Disponível em: <http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/0/0a/Motor_passo.pdf>. Acesso em: 10 mar 2018

WOTIOM. **Motor de Passo NEMA 23 – 15 kgf.cm / 3A**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.wotiom.com/produto/motor-de-passo-nema-23-15-kgf-cm-3a/>> Acesso em: 14 abr 2018.

WOTIOM. **Motor de Passo NEMA 23 – 24 kgf.cm / 2A**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.wotiom.com/produto/motor-de-passo-nema-23-24-kgf-cm-2a/>> Acesso em: 14 abr 2018.